



**Pedro Diogo Barrela dos Santos Gomes**

Lic. em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores

## **Sistema de Monitorização de Energia Eléctrica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Mário Ventim Neves, FCT-UNL

Co-orientador: Professor Doutor João Murta Pina, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Filipe dos Santos Gomes

Arguente: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma

Vogal: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves

Vogal: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro 2012**



Sistema de Monitorização de Energia Eléctrica.

Copyright © 2012 Pedro Diogo Barreira dos Santos Gomes

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus orientadores Prof. Mário Ventim Neves e Prof. João Murta Pina pelo apoio e disponibilidade, bem como todos os conselhos, sugestões e ensinamentos úteis para a realização deste trabalho.

Agradeço também a todos os professores, monitores, amigos e colegas que me acompanharam ao longo destes cinco anos e que contribuíram para a minha formação. Em especial ao meu amigo Ângelo Veiga pela amizade, paciência e por tudo aquilo que ultrapassamos juntos ao longo dos últimos cinco anos.

À minha família, por todo o apoio, amizade, amor, carinho e incentivo.

À Filipa pela paciência, amor, carinho e encorajamento demonstrado que me ajudaram a ultrapassar os momentos mais difíceis, durante a realização desta tese.

Por fim quero fazer um agradecimento muito especial ao meu pai por toda a ajuda, pelo esforço financeiro, por todo o amor e apoio demonstrado não só ao longo do curso, mas ao longo da vida inteira, sem ele nada disto seria realidade. À minha mãe por fazer de mim a pessoa que sou e sempre serei.



## Resumo

O crescente aumento dos consumos energéticos, das emissões de gases poluentes para a atmosfera e a necessidade de uma qualidade de energia cada vez melhor são algumas das preocupações das mais diversas entidades distribuidoras e produtoras de energia.

Contudo, actualmente a solução não depende somente das entidades produtoras, mas também dos consumidores a quem se pede um papel cada vez mais activo na gestão e monitorização dos seus consumos de modo a diminuírem os impactes ambientais resultantes da produção e consumo de energia.

O crescimento tecnológico verificado nos últimos anos possibilitou o aparecimento de diversos dispositivos electrónicos, capazes de monitorizar a rede eléctrica e que se apresentam como ferramentas fundamentais para que o consumidor possa ter cada vez mais um papel activo na gestão dos seus consumos, reduzindo deste modo o impacto ambiental dos mesmos.

Nesta dissertação apresenta-se o projecto e construção de um sistema de monitorização de energia baseado na utilização de um Arduino. O sistema implementado processa a informação em tempo real, permite a elaboração de gráficos e tem como principal objectivo ajudar o consumidor a realizar uma boa gestão energética.

### Palavras-Chave:

Sistema de monitorização de energia, Arduino, qualidade de energia, consumos energéticos.





## Abstract

The increasing energy consumption, emissions of greenhouse gases into the atmosphere and the need for better power quality are some of the concerns of the various entities that distribute and produce energy.

However, now the solution depends not only on the power facilities, but also on the consumers who are asked an increasingly active role in managing and monitoring their consumption in order to reduce the environmental impacts of energy production and consumption.

Technological growths in recent years has enabled the emergence of various electronic devices capable of monitoring the power grid and are presented as fundamental tools for the consumer to have an increasingly active role in managing their consumption, thereby reducing the environmental impact.

This dissertation presents the design and construction of an energy monitoring system based on the use of an Arduino. The implemented system processes information in real time, allows graphic visualization and has as main objective to help users make good energy management.

**Keywords:** Energy monitoring system, Arduino, power quality, energy consumption.



# Índice de Matérias

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Índice de Matérias .....	vii
Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xv
Lista de Acrónimos .....	xvii
1 - Introdução .....	1
1.1 Enquadramento e Motivação .....	1
1.2 Objectivos .....	3
1.3 Organização da Dissertação .....	3
1.4 Contribuições originais deste trabalho .....	4
2 - Fundamentos Teóricos .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Conceito de Qualidade de Energia Eléctrica .....	5
2.3 Normas e certificações relacionadas com a Qualidade de Energia .....	6
2.4 Definições básicas dos parâmetros da tensão .....	6
2.5 Principais problemas da Qualidade da Energia .....	11
2.5.1 Subtensões ou cavas .....	11
2.5.2 Interrupções de muito curta duração ou micro-cortes .....	12
2.5.3 Interrupções longas .....	12
2.5.4 Picos Transitórios .....	13
2.5.5 Sobreensões Temporárias .....	13
2.5.6 Distorção Harmónica .....	14
2.5.7 Tremulação ou “Flicker” .....	15
2.5.8 Ruído .....	15
3 - Monitorização de Energia Eléctrica .....	17
3.1 Eficiência Energética .....	17
3.2 Monitorização da Energia Eléctrica .....	18
Vantagens .....	18
3.3 Sistemas de Monitorização de Energia – Estado de Arte .....	19
3.3.1 Constituição e funcionamento .....	20

3.3.2	Exemplos de sistemas de monitorização de energia .....	21
4 -	Projecto do Sistema de Monitorização .....	31
4.1	Descrição do Sistema .....	31
4.2	Estrutura Geral do Sistema .....	33
4.2.1	Dispositivo de aquisição de dados .....	34
4.2.2	Visualização de dados .....	35
4.3	Hardware .....	37
4.3.1	Microcontrolador .....	37
4.3.2	Transformador de Corrente (TI) .....	42
4.3.3	Transformador de Tensão (TT) .....	45
4.3.4	Condicionamento de Sinal .....	47
4.3.5	Protecções .....	53
4.3.6	Comunicação .....	53
4.4	Firmware .....	55
4.5	Software .....	57
4.6	Módulos de Leitura .....	60
4.7	Especificações .....	60
5 -	Simulação e Resultados .....	63
5.1	Calibração .....	63
5.1.1	Eliminação de offset .....	63
5.1.2	Compensação do factor de fase .....	63
5.1.3	Factores de conversão .....	64
5.2	Erros de Medição .....	64
5.2.1	Valor eficaz da tensão .....	64
5.2.2	Valor eficaz da corrente .....	65
5.2.3	Potência activa .....	66
5.2.4	Potência aparente .....	66
5.2.5	Frequência .....	67
5.2.6	Factor de potência .....	68
5.2.7	Distorção harmónica total .....	68
5.3	Ensaio de Funcionamento .....	70
5.3.1	Ensaio de funcionamento ao nível do quadro eléctrico .....	70
5.3.2	Ensaio de funcionamento ao nível dos equipamentos eléctricos .....	76

5.3.3 Análise sumária de resultados .....	88
6 - Conclusão .....	89
Referências Bibliográficas.....	91
Apêndice I: Lista de Material .....	93



## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Interrupção momentânea (Afonso e Martins, 2003) .....	9
Figura 2.2 – Tensão fundamental com 3ª e 5ª harmónica (Braga, 2009).....	10
Figura 2.3 – Tensão inter-harmónica (Afonso e Martins, 2003) .....	10
Figura 2.4 – Desequilíbrio de tensão (Amorim e Melo, 2007) .....	11
Figura 2.5 – Subtensão momentânea ( <i>sag</i> ) (Afonso e Martins, 2003) .....	12
Figura 2.6 – Micro-cortes de tensão ( <i>notches</i> ) (Afonso e Martins, 2003).....	12
Figura 2.7 – Transitório (Afonso e Martins, 2003).....	13
Figura 2.8 – Sobretensão momentânea ( <i>swell</i> ) (Afonso e Martins, 2003) .....	14
Figura 2.9 – Harmónicas (Afonso e Martins, 2003) .....	15
Figura 2.10 – Flutuação de tensão ( <i>flicker</i> ) (Afonso e Martins, 2003) .....	15
Figura 2.11 – Ruído (interferência electromagnética) (Afonso e Martins, 2003) .....	16
Figura 3.1 – Diagrama de blocos de um sistema de monitorização .....	20
Figura 3.2 – Sistema de monitorização da Chauvin Arnoux (Chauvin Arnoux, 2008).....	22
Figura 3.3 – Sistema de monitorização da Fluke (Fluke, 2012) .....	23
Figura 3.4 – Sistema de monitorização Elite (Efergy, 2009).....	24
Figura 3.5 – Sistema de monitorização Black & Decker e Blue Line .....	26
Figura 3.6 – Sistema de monitorização <i>plug-in</i> da Efergy (Efergy, 2009) .....	28
Figura 3.7 – Sistema de monitorização <i>plug-in</i> da Belkin (Belkin, 2011).....	29
Figura 3.8 – Sistema de monitorização <i>plug-in</i> com <i>wireless</i> da WPMP (Doss, 2011) .....	29
Figura 4.1 – Vista de cima do sistema de monitorização.....	31
Figura 4.2 – Diagrama de blocos geral do sistema. A tracejado - utilização facultativa.....	33
Figura 4.3 – Diagrama de blocos para aquisição de dados.....	34
Figura 4.4 – Interface gráfica do RealTerm .....	36
Figura 4.5 – Arduino Uno (vista de cima) (Arduino,2011).....	38
Figura 4.6 – <i>Shield</i> para introdução do cartão microSD (cooking-hacks, 2012) .....	40
Figura 4.7 – Arduino juntamente com o <i>shield</i> do cartão de memória (cooking-hacks, 2012)...	41
Figura 4.8 – Pormenor de ligação entre o Arduino e o <i>shield</i> .....	42
Figura 4.9 – Sensor de corrente (Efergy, 2009) e as suas dimensões.....	43
Figura 4.10 – Circuito eléctrico do sensor de corrente .....	44
Figura 4.11 – Transformador PCB 12 V AC (Block-Trafo, 2012).....	45
Figura 4.12 – Transformador 9 V AC .....	45
Figura 4.13 – Forma de onda à saída do transformador 9 V AC .....	46
Figura 4.14 – Esquema eléctrico para obtenção do sinal de tensão .....	48
Figura 4.15 – Esquema de ligações do esquema eléctrico do sinal de tensão ao Arduino .....	48
Figura 4.16 – Esquema eléctrico para obtenção do sinal de corrente .....	52

Figura 4.17 - Esquema de ligações para conversão do sinal de corrente em sinal de tensão ..	53
Figura 4.18 – Diferentes tipos de conexão USB .....	54
Figura 4.19 – Detalhe do conector USB tipo A .....	54
Figura 4.20 – Menu principal em ambiente Arduino .....	56
Figura 4.21 – Menu principal em ambiente RealTerm .....	57
Figura 4.22 – Interface gráfica para visualização dos dados referentes à opção #1 do sistema de monitorização .....	58
Figura 4.23 – Formato de gravação de dados para a opção #1 do sistema de monitorização..	58
Figura 4.24 – Interface gráfica para a visualização dos dados instantâneos de corrente e de tensão .....	59
Figura 4.25 – Formato de gravação dos dados da corrente e tensão instantâneos .....	59
Figura 5.1 – Dados obtidos após uma semana de monitorização do quadro eléctrico .....	70
Figura 5.2 – Tensão eficaz ao longo de uma semana .....	71
Figura 5.3 - Potência activa ao longo de uma semana.....	71
Figura 5.4 – Factor de potência ao longo de uma semana .....	71
Figura 5.5 – Realização de <i>zoom</i> para melhor visualização de um determinado intervalo de tempo.....	72
Figura 5.6 – Sinal de tensão obtido por um período de 3 segundos .....	73
Figura 5.7 – Pormenor da forma de onda de tensão para um período de 60 ms.....	73
Figura 5. 8 – Forma de onda da tensão e respectiva transformada de Fourier .....	74
Figura 5.9 – Forma de onda da tensão e respectiva distorção harmónica.....	75
Figura 5.10 – Forma de onda da corrente e respectiva transformada de Fourier .....	75
Figura 5.11 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica .....	76
Figura 5.12 – Dados da monitorização de consumos de um computador .....	77
Figura 5.13 – Forma de onda de tensão e respectiva transformada de Fourier para o computador.....	77
Figura 5.14 – Forma de onda de tensão e respectiva distorção harmónica para o computador	78
Figura 5.15 – Forma de onda de corrente e respectiva distorção harmónica para o computador .....	78
Figura 5.16 - Dados da monitorização de consumos de um computador .....	79
Figura 5.17- Forma de onda da tensão e respectiva transformada de Fourier para o aquecedor .....	79
Figura 5.18 – Form de onda da tensão e respectiva distorção harmónica para o aquecedor .	80
Figura 5.19 - Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para o aquecedor	80
Figura 5.20 – Dados da monitorização de consumos de um microondas.....	81
Figura 5.21 – Forma de onda da tensão e respectiva transformada de Fourier para o microondas .....	82
Figura 5.22 – Forma de onda da tensão e respectiva distorção harmónica para o microondas	82



Figura 5.23 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para o microondas .....	83
Figura 5.24 – Dados da monitorização de consumos de uma lâmpada incandescente de 60 W .....	84
Figura 5.25 - Dados da monitorização de consumos de uma lâmpada fluorescente de 11 W ..	84
Figura 5.26 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para a lâmpada incandescente de 60 W .....	85
Figura 5.27 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para a lâmpada fluorescente de 11 W .....	86
Figura 5.28 – Forma de onda da corrente e respectiva transformada de Fourier para a lâmpada fluorescente de 11 W .....	87
Figura 5.29 – Forma de onda da corrente e respectiva transformada de Fourier para a lâmpada incandescente de 60 W .....	87



## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Resumo dos sistemas de monitorização ao nível do quadro eléctrico.....	25
Tabela 3.2 – Resumo dos sistemas de monitorização ao nível do contador electromecânico ..	27
Tabela 3.3 – Resumo dos sistemas de monitorização ao nível do equipamento eléctrico .....	30
Tabela 4.1 – Resumo das características do Arduino .....	39
Tabela 4.2 – Resumo de dados do transformador 9 V AC .....	46
Tabela 4.3 – Especificações do sistema de monitorização implementado .....	61
Tabela 5.1 – Erro de medição para o valor eficaz da tensão .....	65
Tabela 5.2 – Erro de medição para o valor eficaz da corrente .....	65
Tabela 5.3 – Erro de medição para os valores de potência activa .....	66
Tabela 5.4 – Erro de medição para os valores de potência aparente .....	67
Tabela 5.5 – Erro de medição para os valores de frequência .....	67
Tabela 5.6 – Erro de medição para os valores do factor de potência .....	68
Tabela 5.7 – Erro de medição para os valores da distorção harmónica total da tensão .....	69
Tabela 5.8 – Erro de medição para os valores da distorção harmónica total da corrente .....	69



## Lista de Acrónimos

AC – *Alternating Current*  
ADC – *Analog to Digital Converter*  
BT – Baixa Tensão  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono  
DC – *Direct Current*  
DHT – Distorção Harmónica Total  
DHT – Distorção Harmónica Total  
EDP – Energias De Portugal  
EN – *European Norm*  
FP – Factor de Potência  
GEE – Gás Efeito de Estufa  
GND – *Ground*  
GUI - *Graphical User Interface*  
ICSP – *In-Circuit Serial Programming*  
IDE – *Integrated Development environment*  
IEC – *International Electrotechnical Commission*  
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*  
LCD – *Liquid Crystal Display*  
MISO – *Master In Slave Out*  
MOSI – *Master Out Slave In*  
MT – Média Tensão  
PC – *Personal Computer*  
PCB – *Printed Circuit Board*  
SD – *Secure Digital*  
UE – União Europeia  
UPS – *Uninterruptible Power Supply*  
URE – Utilização Racional de Energia  
USB – *Universal Serial Bus*



# 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A electricidade tem cada vez mais um papel preponderante sendo que constitui um factor crucial para o desenvolvimento económico e social do mundo, da qualidade de vida dos seus cidadãos e consumidores (CE, 2008a).

Contudo, a produção de energia eléctrica tem a sua origem sobretudo em produtos cuja taxa de renovação é lenta, ou mesmo inexistente, os chamados combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural.

A escassez destes produtos, associada ao facto dos mesmos libertarem para a atmosfera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) juntamente com outros gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa, provocando alterações climáticas que se podem tornar irreversíveis, alertaram a sociedade para a necessidade de tomar medidas que pudessem fazer face a estes factores.

Com o objectivo de controlar o nível de emissões de gases tóxicos para a atmosfera, a 11 Dezembro de 1997, foi criado no Japão, na cidade de Kyoto o protocolo que dá pelo mesmo nome, sendo que para este entrar em vigor precisou que 55 países, que em conjunto, produzem cerca de 55% das emissões, o ratificassem pelo que entrou em vigor somente em 16 de Fevereiro de 2005. Este protocolo constitui um tratado internacional cujas medidas, de acordo com o artigo 3 do mesmo, pressupõe uma redução na emissão de gases do efeito de estufa para valores 5% abaixo dos valores registados em 1990 no período de 2008 e 2012. (Kyoto, 1997).

Somado ao impacte ambiental causado pela utilização de combustíveis fósseis existe igualmente uma grande preocupação ao nível económico. Tendo em conta a sua escassez estes produtos tendem a ter preços extremamente voláteis, sendo que a tendência é a verificação de um aumento do preço, devido à redução da disponibilidade dos mesmos, afectando o desenvolvimento económico e social dos diversos países. Um outro motivo de preocupação é o facto do aumento do efeito de estufa e as alterações climáticas dele resultante poderem ser catastróficas para a agricultura tendo um impacto devastador para a economia mundial ou levando mesmo à falta de alimentos.

Atendendo a todos os problemas e implicações resultantes da utilização dos combustíveis fósseis, a grande maioria dos países tem começado a reduzir os seus consumos de energia primária, respeitando deste modo as regras impostas pelo Protocolo de Kyoto. Os fortes investimentos ao nível das energias renováveis e na eficiência energética têm sido as principais medidas no caminho da sustentabilidade energética, uma vez que são economicamente benéficas, aumentam a segurança no abastecimento e reduzem as emissões de gases poluentes (IPCC, 2007).

A principal chave de mudança encontra-se então na forma como a energia eléctrica é utilizada. O aumento da preocupação por partes dos produtores e consumidores na gestão dos seus consumos, utilização e aproveitamento da energia eléctrica constitui uma medida importante para a diminuição dos impactes ambientais resultantes da sua produção e utilização.

Uma monitorização eficaz dos consumos de electricidade realizados é essencial no processo de gestão de energia, sendo que um conhecimento detalhado da forma como a energia eléctrica é consumida e os respectivos custos servem de motivação para a mudança de comportamentos (Darby, 2006).

Um outro factor importante relacionado com a energia eléctrica é a sua qualidade, sendo que o conceito de Qualidade de Energia Eléctrica (QEE), *Power Quality*, foi referido pela primeira vez em 1968 (Bollen, 2000).

Uma monitorização eficaz dos consumos de energia não é suficiente para fazer face às necessidades do mundo actual, é também necessário que a energia eléctrica seja de elevada qualidade evitando deste modo a existência de problemas na rede de distribuição.

Nenhum dos fenómenos actualmente utilizados para a analisar a QEE é novo, contudo devido ao importante crescimento tecnológico ocorrido nos últimos anos na área da electrónica, que levou ao desenvolvimento de diversas tecnologias que potenciam uma redução do consumo de energia eléctrica, fez com que estes fenómenos tivessem um papel cada vez mais importante e relevante.

A proliferação de dispositivos electrónicos, tais como variadores electrónicos de velocidade, electrodomésticos e outros dispositivos como díodos, transístores, microprocessadores, entre outros, vieram permitir um uso da electricidade de uma forma mais eficiente, efectuando um controlo mais eficaz, melhorando os rendimentos e os custos, permitindo a execução de tarefas anteriormente impossíveis.

Contudo, o facto de a grande maioria destes dispositivos ser não lineares, levou à introdução de perturbações muito significativas na qualidade da energia eléctrica, consumindo correntes não sinusoidais e introduzindo desta forma harmónicas na rede. Estas perturbações introduzidas na rede eléctrica são fatais quer para os próprios dispositivos que as introduzem, pois estes normalmente são altamente sensíveis às variações dos parâmetros característicos da energia que recebem, quer para o consumo e gestão da energia consumida.

Como tal o aparecimento de sistemas capazes de monitorizar e guardar os registos históricos dos consumos de energia eléctrica bem como da sua qualidade, representa uma importante solução de optimização. O recurso a este tipo de sistemas permite ao consumidor uma gestão mais eficiente dos consumos de electricidade e, conseqüentemente, um aumento potencial da eficiência energética. Os sistemas de monitorização desempenham então um papel de elevada importância, tanto para a sociedade como para o ambiente, na medida em que possibilitam uma redução dos custos e consumos de energia eléctrica, permitem analisar a qualidade da energia evitando que alterações na mesma possam levar à destruição de



aparelhos electrónicos e ajudam a minimizar os problemas subjacentes à produção de electricidade (Delgado, 2000).

## 1.2 Objectivos

A utilização racional de energia tem como base um conjunto de acções e medidas, que têm como objectivo a melhor utilização da energia, tanto no sector doméstico, como no sector industrial.

O trabalho proposto tem por objectivo desenvolver um sistema que permita realizar a monitorização de consumos de energia numa determinada instalação bem como monitorizar alguns parâmetros relativos à QEE recorrendo especificamente a um microcontrolador, o Arduino. O sistema a desenvolver deve permitir:

- Monitorizar os consumos de energia;
- Monitorizar os valores eficazes de tensão e corrente;
- Monitorizar do Factor Potência;
- Monitorizar parâmetros relativos à QEE;
- Gravar dados;
- Gerar gráficos.

O trabalho é dividido em duas partes, uma primeira parte relativa à construção de uma plataforma de *hardware*, constituída pelo Arduino e os sensores necessários à monitorização dos diferentes parâmetros e uma segunda parte relativa ao desenvolvimento de um ambiente gráfico que permita ao utilizador uma melhor análise e interpretação dos dados recolhidos.

Com o desenvolvimento deste sistema pretende-se ajudar o utilizador a optimizar e reduzir os consumos de energia eléctrica e controlar os efeitos das suas acções na qualidade da energia.

## 1.3 Organização da Dissertação

Além da Introdução, a dissertação é composta por cinco capítulos adicionais.

No Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos – é feita uma análise às normas e parâmetros avaliados na qualidade da energia eléctrica. Este capítulo incide ainda sobre os principais problemas da qualidade de energia.

No Capítulo 3 – Monitorização de Energia Eléctrica – é feita uma análise sobre a eficiência energética e descreve-se a importância e as vantagens da monitorização da energia eléctrica. Este capítulo foca-se também no estado da arte, onde se apresentam os diversos sistemas de monitorização actualmente comercializados.

O Capítulo 4 – Projecto do Sistema de Monitorização – tal como o nome indica, incide sobre as diferentes fases de construção do sistema de monitorização, nomeadamente o

dimensionamento, a construção do sistema de monitorização e a implementação da interface gráfica.

No Capítulo 5 – Simulação e Resultados – são apresentados os diferentes ensaios realizados para comprovar o correcto funcionamento do sistema de monitorização e os erros de medição existentes. São ainda apresentados diversos estudos realizados ao nível do quadro eléctrico e dos equipamentos eléctricos, de forma a validar a implementação.

## 1.4 Contribuições originais deste trabalho

Algumas das contribuições originais deste trabalho foram a utilização do Arduino para a monitorização da qualidade de energia da rede eléctrica. A capacidade de realizar um estudo sobre os valores instantâneos de tensão e corrente da rede bem como a distorção harmónica existente nas formas de onda dos diferentes sinais permitiu estudar os efeitos da introdução dos diferentes dispositivos eléctricos na rede. Um outro aspecto a distinguir é a possibilidade de utilização de um cartão de memória flash para gravação de dados. A utilização do cartão de memória permite uma maior mobilidade ao utilizador bem como a gravação de um elevado número de dados. Foi ainda implementada uma aplicação gráfica recorrendo à linguagem de programação Matlab, a qual permite ao utilizador uma melhor percepção e avaliação dos dados recolhidos.

Em geral este trabalho difere dos outros sistemas de monitorização, na mesma gama de preços, pelo facto de permitir a realização de gráficos, a gravação de dados e a monitorização da qualidade de energia da rede.

## 2 - Fundamentos Teóricos

Nos fundamentos teóricos são apresentados os assuntos que constituem a introdução teórica desta dissertação.

### 2.1 Introdução

Como referido anteriormente, ao longo dos últimos anos tem havido uma preocupação crescente em tentar controlar e melhorar os consumos energéticos e as alterações na qualidade da energia eléctrica causadas pelos diferentes dispositivos na rede eléctrica. A introdução de dispositivos, cada vez mais sensíveis, veio aumentar a necessidade de se efectuar uma monitorização mais eficaz da qualidade da energia distribuída.

Um dos meios para realizar um controlo mais eficaz da qualidade da energia é a realização de uma monitorização ao nível do consumidor. Deste modo é possível ao consumidor visualizar os impactos dos diversos dispositivos electrónicos na rede bem como possíveis implicações no funcionamento de outros dispositivos mais sensíveis. É necessário envolver cada vez mais o consumidor de modo a consciencializa-lo e ajuda-lo a alterar alguns dos seus comportamentos energéticos.

### 2.2 Conceito de Qualidade de Energia Eléctrica

O conceito de Qualidade de Energia está relacionado com um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema eléctrico, tais como, desequilíbrio de tensões, a distorção harmónica, a variação da amplitude, a frequência da tensão e as interrupções de serviço, sendo que há alguns anos o conceito encontrava-se somente relacionado com as interrupções de serviço, ou seja as falhas no fornecimento de tensão.

O conceito de QEE tem vindo a sofrer diversas alterações de modo a adaptar-se às diversas evoluções tecnológicas e à introdução na rede eléctrica de um número cada vez maior de cargas não lineares.

Propõe-se como definição para a falta de qualidade de energia: “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falhas ou mau funcionamento de equipamentos”.

Este problema vem-se agravando em todo o mundo maioritariamente devido a dois factores:

- Maior sensibilidade dos equipamentos às perturbações de qualidade de energia.
- Instalação de um número cada vez maior de cargas não lineares. A crescente preocupação por uma boa gestão da energia eléctrica tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, introduzem na rede distorções harmónicas e podem levar o sistema a situações de ressonância.

A qualidade da energia eléctrica pode ser descrita segundo as seguintes dimensões (Lopes, 1998):

1. A qualidade da energia eléctrica (designada na literatura inglesa por “*Power Quality*”), caracterizada pela existência de um “produto” energia eléctrica onde todos os parâmetros característicos estão muito próximos dos valores nominais desejados (frequência, sistema de tensões com amplitude constante, equilibrado e simétrico, formas de onda sinusoidais);

2. A continuidade do serviço ou fiabilidade (designada na literatura inglesa por “*Power Reliability*”), relacionada com a qualidade do fornecimento (a potência contratada deve estar sempre disponível e com qualidade na onda).

Podemos pois afirmar que do ponto de vista do “produto” disponibilizado, a qualidade da energia eléctrica é tanto mais elevada quanto mais próximos estiverem todos os seus parâmetros dos valores nominais que a definem (Barros, 1999).

## 2.3 Normas e certificações relacionadas com a Qualidade de Energia

Com a evolução do conceito de Qualidade de Energia foi necessária a criação de um sistema de normas com o objectivo de estabelecer padrões. Estas normas têm por objectivo a regulamentação de serviços, estabelecendo regras, directrizes, ou características acerca de um produto, material, processo ou serviço. Segue a lista de algumas normas directamente relacionadas com o conceito de qualidade de energia:

- EN50160: é uma norma relativamente recente criada no ano de 2004 onde se encontram as características da tensão nas redes de distribuição pública.
- IEC 6100-4-15: é uma norma de medição da tremulação energética e que inclui especificações para medidores.
- IEC 6100-4-7: é uma norma que descreve uma técnica de medição padrão para as harmónicas.
- IEEE 1159 (1995): é uma prática recomendada pela IEEE para a monitorização e interpretação dos fenómenos que causam problemas de qualidade de energia.
- CBEMA: *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*. A curva CBEMA define os níveis de tolerância dos equipamentos, em função da magnitude e duração das variações de tensão durante uma perturbação. Perturbações que se encontrem fora da curva podem causar estragos nos diversos equipamentos.

## 2.4 Definições básicas dos parâmetros da tensão

As seguintes definições encontram-se descritas na norma EN50160, sendo que esta foi a norma adoptada para avaliar alguns dos parâmetros relativos à qualidade de energia. De seguida apresenta-se a lista dos referidos parâmetros.

- Tensão de Alimentação

Valor eficaz da tensão presente num dado momento no ponto de entrega, medido num dado intervalo de tempo.

- Tensão nominal de uma rede ( $U_n$ )

Tensão que caracteriza uma rede e em relação à qual são referidas certas características de funcionamento.

- Tensão de alimentação declarada ( $U_c$ )

Tensão nominal  $U_n$  da rede, salvo se, por acordo entre o fornecedor e o cliente, a tensão de alimentação aplicada no ponto de entrega diferir da tensão nominal, caso em que essa tensão é a tensão de alimentação declarada  $U_c$ .

- Baixa Tensão (BT)

Para efeitos da presente norma, tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal tenha o limite máximo de 1kV.

- Média Tensão (MT)

Para efeitos da presente norma, tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal seja superior a 1 kV e não superior a 35 kV.

- Condição normal de exploração

Para uma rede, condição permitindo corresponder à procura da carga, às manobras da rede e à eliminação de falhas pelos sistemas de protecção automática, na ausência de condições excepcionais ligadas a influências externas ou a incidentes importantes.

- Perturbação conduzida

Fenómeno electromagnético propagado através dos condutores de uma rede. Em certos casos, pode propagar-se um fenómeno electromagnético através dos enrolamentos dos transformadores e consequentemente entre redes de diferentes níveis de tensão. Estas perturbações podem degradar o funcionamento de um dispositivo, de um equipamento ou de um sistema, ou provocar danos.

- Frequência da tensão de alimentação

Taxa de repetição da onda fundamental da tensão de alimentação, medida durante um dado intervalo de tempo.

- Variação de tensão

Aumento ou diminuição da tensão provocada pela variação da carga total da rede ou de parte desta.

- Variação rápida de tensão

Uma variação do valor eficaz da tensão entre dois níveis consecutivos mantidos durante tempos definidos mas não indicados.

- Flutuação de tensão

Série de variações da tensão ou variação cíclica da envolvente de uma tensão.

- Tremulação (*flicker*)

Impressão de instabilidade da sensação visual provocada por um estímulo luminoso cuja luminância ou repartição espectral flutua no tempo.

- Severidade da tremulação

Intensidade do desconforto provocado pela tremulação definida pela medição da tremulação e avaliada segundo os seguintes valores:

- Severidade de curta duração ( $P_{st}$ ) medida num período de 10 min
- Severidade de longa duração ( $P_{lt}$ ) calculada sobre uma sequência de 12 valores de  $P_{st}$  relativos a um intervalo de duas horas, segundo a equação 2.1.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

- Cava (abaixamento) da tensão de alimentação

Diminuição brusca da tensão de alimentação para um valor situado entre 90 % a 1 % de  $U_c$ , seguida do restabelecimento da tensão depois de um curto lapso de tempo. Por convenção, uma cava de tensão dura de 10 ms a 1 min. O valor de uma cava de tensão é definido como sendo a diferença entre a tensão eficaz durante a cava de tensão e a tensão declarada. As variações de tensão que não reduzam a tensão de alimentação a um valor inferior a 90 % de  $U_c$  não são consideradas como cavas de tensão.

- Interrupção de alimentação

Situação em que a tensão de alimentação no ponto de entrega é inferior a 1 % da tensão declarada  $U_c$ . Uma interrupção da alimentação, tal como a verificada na Figura 2.1, pode ser classificada como:

- Prevista, quando os clientes são informados com antecedência, para permitir a execução de trabalhos programados na rede, ou
- Acidental, quando provocada por defeitos permanentes ou transitórios, na maior parte das vezes ligados a acontecimentos externos, a avarias ou a interferência. Uma interrupção acidental pode ser classificada como:
  - Interrupção longa (superior a 3 min) provocada por um defeito permanente,
  - Interrupção breve (não superior a 3 min) provocada por um defeito transitório.

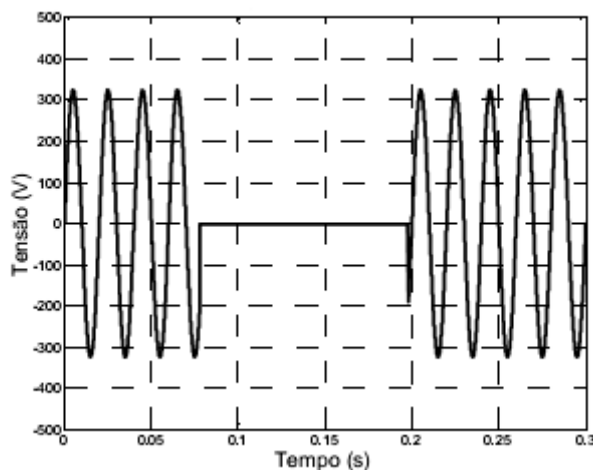


Figura 2.1 – Interrupção momentânea (Afonso e Martins, 2003)

- Sobretensão temporária à frequência industrial

Sobretensão ocorrendo num dado local com uma duração relativamente longa.

- Sobretensão transitória

Sobretensão, oscilatória ou não, de curta duração, em geral fortemente amortecida e com uma duração máxima de alguns milissegundos.

- Tensão harmónica

Tensão sinusoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da tensão de alimentação. Na Figura 2.2 é possível verificar a tensão fundamental bem como duas tensões sinusoidais, correspondentes à 3ª e 5ª harmónica. As tensões harmónicas podem ser avaliadas:

- Individualmente, segundo a sua amplitude relativa  $U_h$  relacionada com a tensão fundamental  $U_1$ , em que “h” representa a ordem da harmónica;
- Globalmente, ou seja, pelo valor da distorção harmónica total (THD) calculado pela equação 2.2:

$$THD_u = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}{U_1^2}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

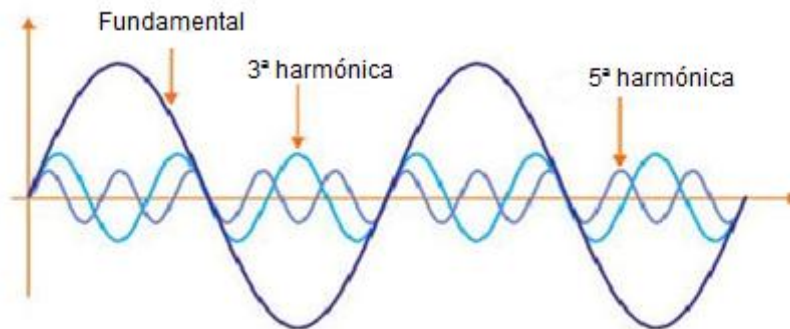


Figura 2.2 – Tensão fundamental com 3ª e 5ª harmónica (Braga, 2009)

- Tensão inter-harmónica

Tensão sinusoidal cuja frequência está compreendida entre as frequências das harmónicas, ou seja, cuja frequência não é múltiplo inteiro da frequência fundamental.

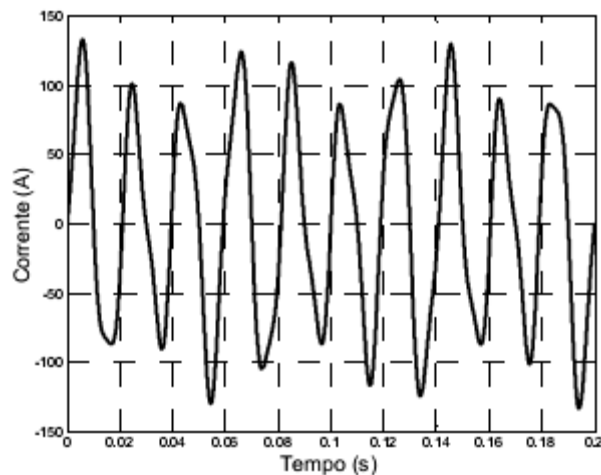


Figura 2.3 – Tensão inter-harmónica (Afonso e Martins, 2003)

- Desequilíbrio de tensão

Estado no qual os valores eficazes das tensões das fases ou das defasagens entre tensões de fases consecutivas, num sistema trifásico, apresentam amplitudes diferentes ou desfasamento assimétrico, diferente de  $120^\circ$ . Tal facto é verificável na Figura 2.4.



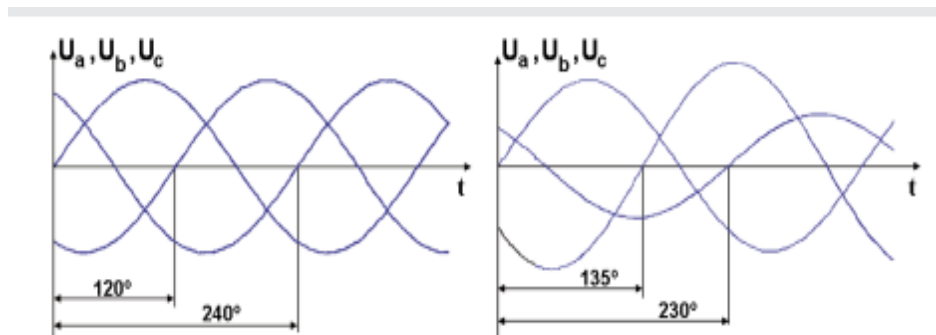


Figura 2.4 – Desequilíbrio de tensão (Amorim e Melo, 2007)

- Sinal de informação transmitido na rede

Sinal sobreposto à tensão de alimentação destinado à transmissão de informações na rede e nas instalações de clientes. Podem transmitir-se por meio da rede os seguintes três tipos de sinais:

- Sinais de telecomando centralizado: sinais de tensão sinusoidal sobrepostos na gama de 110 a 3000 Hz,
- Sinais de corrente portadora: sinais de tensão sinusoidal sobrepostos na gama de 3 a 148,5 kHz,
- Sinais de marcação de onda: impulsos (transitórios) de curta duração sobrepostos em pontos escolhidos da forma de onda da tensão.

## 2.5 Principais problemas da Qualidade da Energia

Os factores que interferem com a qualidade da energia eléctrica podem ter origem na no local de geração, na degradação introduzida pelo sistema de transmissão, na degradação introduzida pelo sistema de distribuição ou na degradação introduzida pelas cargas.

As perturbações mais relevantes e frequentemente observadas nos sistemas de distribuição actuais encontram-se de seguida sucintamente enumeradas.

### 2.5.1 Subtensões ou cavas

Subtensões, cavas ou “Sags” que como referido anteriormente são um decréscimo temporário do valor da tensão com uma duração curta (10 ms a 1 minuto) ou longa (superior a 1 minuto) e com redução de amplitude grave (10 % a 80 % do valor nominal) ou ligeira (80% a 90 % do valor nominal). A sua principal causa são defeitos na rede de transporte e distribuição, defeitos nas instalações dos clientes, ligação de grandes cargas e arranque de motores de grande potência. As suas consequências são o disparo de disjuntores e de relés electromecânicos, perda de rendimento nas máquinas eléctricas rotativas, paragem de sistemas de controlo industrial baseado em microprocessador (Delgado, 2002).

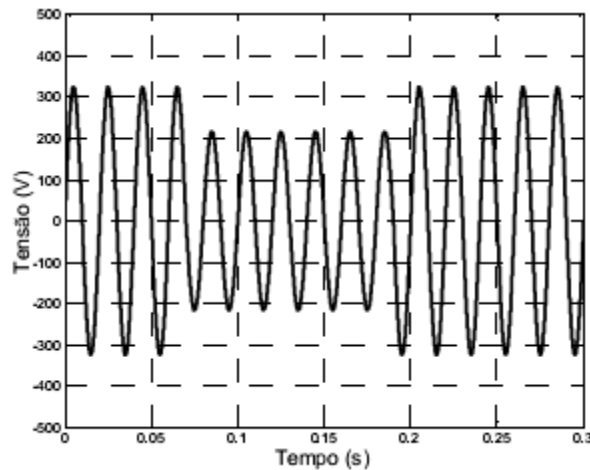


Figura 2.5 – Subtensão momentânea (sag) (Afonso e Martins, 2003)

### 2.5.2 Interrupções de muito curta duração ou micro-cortes

Esta perturbação caracteriza-se pela interrupção total do fornecimento de energia, desde alguns milissegundos até um ou dois segundos, Figura 2.6. As suas causas são devidas sobretudo a operações de comutação realizadas por dispositivos de abertura e rearme automático, para isolar um problema e manter o fornecimento à área em causa. Podem ser devidas a falhas de equipamentos, descargas atmosféricas, contornamentos nos isoladores, erro humano, acidente, etc. As suas consequências são o disparo de alguma aparelhagem de segurança, perdas de informação, danificação de equipamentos de processamento de informação, paragem de muitos equipamentos sensíveis se não estiverem preparados para lidar com este tipo de situação (Delgado, 2002).

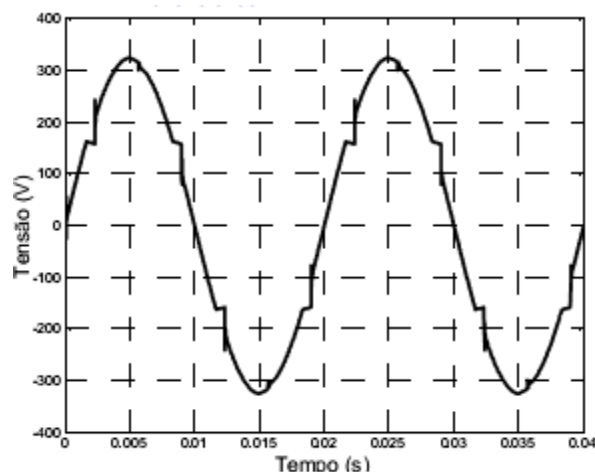


Figura 2.6 – Micro-cortes de tensão (*notches*) (Afonso e Martins, 2003)

### 2.5.3 Interrupções longas

Características idênticas às interrupções de curta duração, mas com duração superior. As suas causas podem ser devidas a falhas de equipamentos, más condições climáticas,

incêndios, erro humano ou acidente com as linhas. A sua consequência é a paragem de todos os equipamentos (Delgado, 2002).

#### 2.5.4 Picos Transitórios

Geralmente são variações muito rápidas do valor da tensão, da ordem dos microssegundos a poucos milissegundos, mas de grande importância, uma vez que submetem os equipamentos a elevadas solicitações de tensão (Delgado, 2002).

Existem dois tipos de transitórios: os impulsivos e os oscilatórios.

A principal causa para os transitórios impulsivos são as descargas atmosféricas sendo que estes podem ser definidos como uma alteração repentina das condições de regime permanente da tensão, caracterizando-se por apresentar impulsos unidireccionais em polaridade (negativo ou positivo) e com uma frequência bastante diferente daquela da rede eléctrica.

Os transitórios oscilatórios são caracterizados por uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão possuindo valores de polaridade positiva e negativa. Estes transitórios normalmente são causados por operações de comutação efectuadas pelo fornecedor, ou na comutação de bancos de condensadores, arranque ou paragem de máquinas e equipamentos, descargas electrostáticas (Delgado, 2002).

O aparecimento de transitórios provoca a destruição de componentes, de isolamentos, de placas de circuito impresso e de circuitos integrados, erros nos sistemas de processamento de dados, perdas de informação pelas memórias e sistemas de armazenamento, interferência electromagnética, entre outros aspectos. Na Figura 2.7 é possível observar um pico transitório oscilatório.

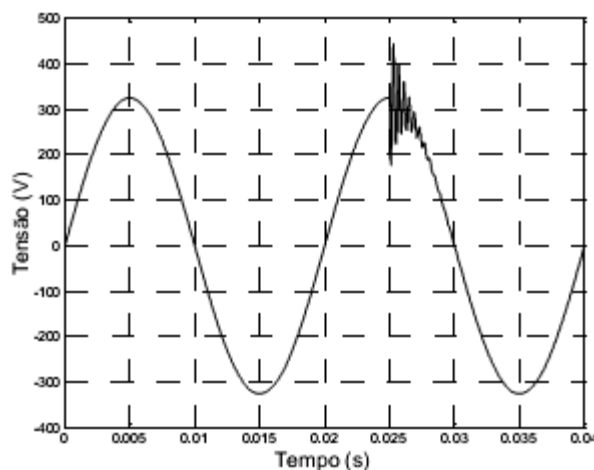


Figura 2.7 – Transitório (Afonso e Martins, 2003)

#### 2.5.5 Sobretensões Temporárias

Uma sobretensão ou “Swell” é definida como um aumento temporário do valor eficaz de tensão com designação de picos se a duração for muito curta, ou de sobretensões se a

duração for superior a alguns segundos. As causas principais são o arranque ou paragem de equipamentos de grande potência, curto circuitos, sistemas de alimentação de energia mal dimensionados, transformadores mal regulados em períodos de vazio, etc. As sobretensões temporárias podem levar a perdas de informação de sistemas informáticos, variação do brilho em sistemas de iluminação, tremular de ecrãs de computadores, paragem de equipamentos ou danificação de equipamentos electrónicos, se os valores forem muito elevados.

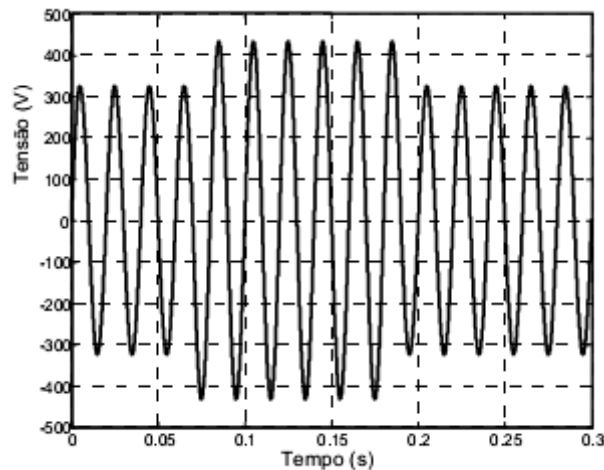


Figura 2.8 – Sobretensão momentânea (*swell*) (Afonso e Martins, 2003)

### 2.5.6 Distorção Harmónica

Quando ocorre distorção harmónica a forma de onda da tensão não é sinusoidal, visto que a onda resultante é formada pela adição de sinais com diferentes amplitudes e fases, e com frequências múltiplas da tensão fundamental, como verificado na Figura 2.9. As causas são inúmeras tais como transformadores a trabalhar na zona de saturação magnética, fornos a arco, aparelhos de soldar, motores com escovas e mais recentemente todo o tipo de cargas não lineares como equipamentos informáticos, iluminação de alto rendimento, aparelhos de ar condicionado, UPS's, entre outras. As consequências são a possibilidade de ocorrência de ressonâncias nos circuitos, problemas no neutro dos sistemas trifásicos, sobreaquecimento geral de cabos e equipamentos, perda de rendimento de máquinas rotativas, interferência electromagnética com sistemas de comunicação, erros na aparelhagem de medida convencional, disparo intempestivo de protecções térmicas (Delgado, 2002).

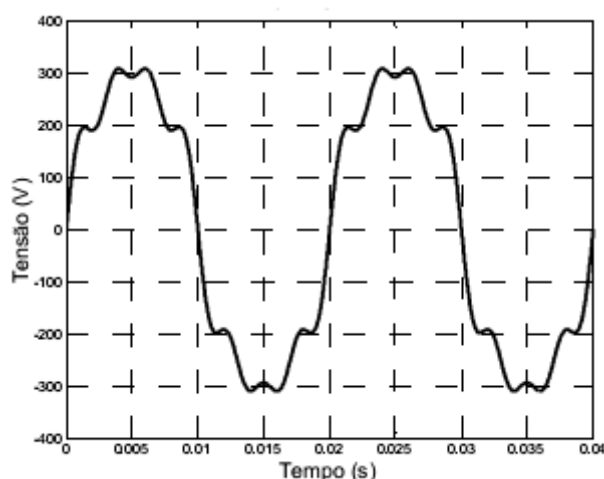


Figura 2.9 – Harmônicas (Afonso e Martins, 2003)

### 2.5.7 Tremulação ou “Flicker”

A tremulação representa a flutuação do valor da tensão, modulado em amplitude por um sinal com frequências que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental e da ordem dos 0 a 30 Hz e com amplitudes de 80 a 90% do valor da tensão nominal (Delgado 2002). Estas frequências são provenientes de fornos de arco, arranque e paragem frequente de motores eléctricos, cargas oscilantes e máquinas de soldar a electrogéneo. As consequências sobre todo o tipo de receptores são bastante nefastas e comuns com as das subtensões, embora as mais visíveis se manifestem no tremular da intensidade luminosa emitida por aparelhos de iluminação. Na Figura 2.10 é possível visualizar a flutuação da tensão ao longo do tempo (Afonso e Martins, 2003).

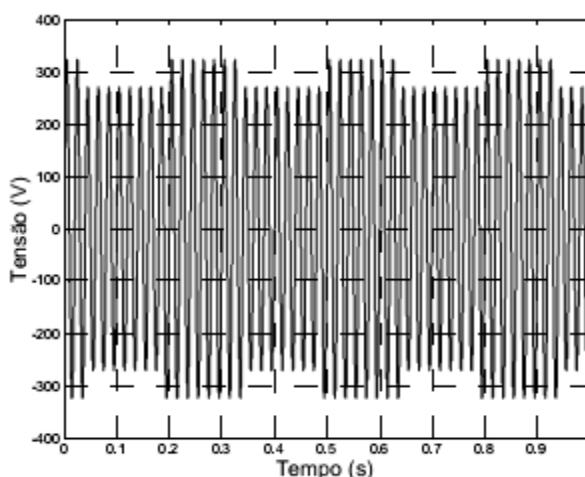


Figura 2.10 – Flutuação de tensão (*flicker*) (Afonso e Martins, 2003)

### 2.5.8 Ruído

O ruído é representado por uma sobreposição de sinais de alta frequência sobre a frequência fundamental como verificável na Figura 2.11. O ruído é causado por interferências

electromagnéticas provocadas por sistemas com feixes hertzianos, microondas, difusão de televisão, soldadura e fornos a arco, terras deficientes, impressoras laser e outros equipamentos electrónicos. O ruído pode levar à ocorrência de perturbações nos equipamentos electrónicos sensíveis, mas geralmente não destrutivos. Pode causar ainda erros e perdas de informação nos sistemas de processamento de dados.

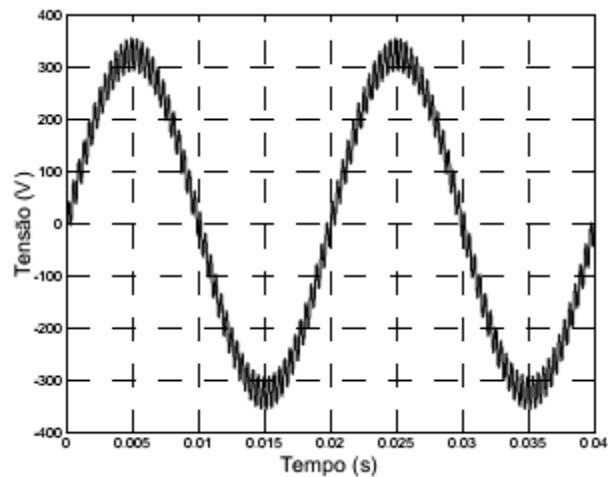


Figura 2.11 – Ruído (interferência electromagnética) (Afonso e Martins, 2003)

## 3 - Monitorização de Energia Eléctrica

O presente capítulo incide sobre a eficiência energética, as vantagens da monitorização da energia e ainda sobre o estudo de alguns dos sistemas de monitorização actualmente utilizados e comercializados.

### 3.1 Eficiência Energética

Nas últimas décadas, a procura crescente por energia, os preços flutuantes do petróleo, fontes de energia incertas e os receios do aquecimento global alertaram para o facto de que os fornecimentos fiáveis e seguros de energia não podem ser tidos como certos (European Union, 2008).

Actualmente, os líderes da União Europeia (UE), comprometeram-se a promover a eficiência energética, pois esta é altamente relevante para os cidadãos da UE. As variações de preço e disponibilidade energética causam uma grande pressão tanto nos consumidores particulares como na indústria onde pequenas alterações nos custos de produção podem trazer grandes implicações. Deste modo, reduzir o consumo de energia é a melhor resposta sustentável a longo prazo.

Reduzir o consumo de energia é uma forma simples de diminuir também os impactes ambientais resultantes da produção de electricidade. Em Janeiro de 2007, a Comissão Europeia apresentou uma proposta integrada de energia/clima (Conselho da União Europeia, 2008), que abordou as questões do aprovisionamento energético, alterações climáticas e desenvolvimento industrial que foi aprovada a Março de 2007.

Esta proposta prevê que até ao ano de 2020 ocorra uma poupança de energia de 20%, uma redução de 20% em gás de efeito de estufa (GEE), que 20 % do consumo energético global da UE tenha origem em energias renováveis e 10 % dos combustíveis para transportes tenha origem em energias renováveis (European Union, 2008).

Existe na Europa, desde 2006, um plano de acção com o nome “Plano de Acção sobre eficiência energética: Concretizar o Potencial” (Conselho da União Europeia, 2006). Este plano aborda 6 áreas-chave com o maior potencial de poupança de energia, sendo elas, produtos, edifícios e serviços, transporte, transformação de energia, financiamento e parcerias internacionais.

O uso de energia nos edifícios comerciais e residências é responsável por 40 % dos consumos totais de energia e emissão de  $CO_2$ , sendo que uma grande parte dessa percentagem se destina a climatização ambiente (IEA, 2008). Actualmente encontram-se a ser implementadas medidas importantes nas fases de projecto e construção dos edifícios com o objectivo de poupar energia, e aumentar a eficiência energética, nomeadamente através da utilização de vidros duplos com caixilharias de baixa transmissão térmica, utilização de bons isolamentos térmicos nas paredes e nas tubagens de água quente, entre outros (IEA, 2008).

É igualmente possível alcançar uma elevada eficiência energética baseada em alterações comportamentais e tecnológicas, sendo estas alterações frequentemente associadas ao termo “Utilização Racional de Energia” (URE), que pressupõe a adopção de medidas que permitem uma melhor utilização da energia, tanto no sector doméstico, como nos sectores de serviços e indústria. A URE visa proporcionar o mesmo nível de produção de bens, serviços e de conforto através de tecnologias que reduzem os consumos face a soluções convencionais. A URE pode conduzir a reduções substanciais do consumo de energia e das emissões de poluentes associadas à sua conversão (EDP,2005). A URE trata-se sobretudo de uma questão de comportamento individual e reflecte a consciência e racionalidade dos consumidores.

### 3.2 Monitorização da Energia Eléctrica

A monitorização da energia eléctrica fornece informação detalhada que pode auxiliar o consumidor a realizar decisões que o levem a obter uma melhor utilização racional da energia, reduzindo deste modo os seus consumos.

A monitorização dos consumos permite ao utilizador consciencializar-se como certos comportamentos influenciam significativamente seu consumo energético. A criação de um registo histórico de consumos vai permitir ao consumidor conhecer os padrões dos consumos de energia na sua habitação, levando-o a adoptar medidas e acções que alterem os mesmos.

Os aparelhos de monitorização são aparelhos passivos, pelo que estes limitam-se a monitorizar os consumos e não a alterar os mesmos, a alteração dos mesmos cabe unicamente ao consumidor.

#### Vantagens

O conhecimento dos hábitos de consumo e das suas consequências, pode auxiliar o consumidor a alterar os mesmos, conduzindo a diversas e importantes vantagens:

- Ambientais: Um melhor conhecimento de como a energia eléctrica é utilizada, permite a implementação de medidas com o objectivo de melhorar a eficiência energética. A redução dos consumos leva a uma redução da utilização de recursos naturais, renováveis e não renováveis, utilizados na produção de electricidade e consequentemente uma redução dos gases de efeito de estufa.
- Económicas: Um conhecimento dos consumos de energia, permite uma redução dos mesmos, uma melhoria da eficiência energética e uma redução dos gastos na factura da electricidade.
- Políticas: A redução dos consumos e do aumento da eficiência energética resultantes da monitorização, vai de encontro com as políticas e o plano acordado pelos países membros da União Europeia.



### 3.3 Sistemas de Monitorização de Energia – Estado de Arte

O crescimento tecnológico verificado na área da electrónica permitiu nos últimos anos o desenvolvimento de diversos sistemas capazes de medir, guardar e disponibilizar em tempo real a informação relativa aos consumos de energia eléctrica realizados.

Existem diversos tipos de sistemas que podem ser utilizados para a monitorização dos consumos de electricidade, quer a nível doméstico quer a nível industrial. Os mais avançados tecnologicamente são os chamados contadores inteligentes, ou *Smart Meters*. Estes contadores substituem o contador tradicional e são capazes de fornecer uma informação mais detalhada que os contadores tradicionais, o que permite tanto ao utilizador como ao fornecedor um controlo mais eficaz da utilização da energia eléctrica. A informação é enviada ao fornecedor de electricidade através de uma rede de comunicação. Assim, estes novos contadores, não só ajudam o consumidor a controlar os gastos e custos energéticos, como permitem também ao fornecedor uma melhor gestão da produção e transporte da energia.

No entanto, os contadores inteligentes são sistemas complexos, recentes e relativamente caros, não se encontrando acessíveis a todos os consumidores. Para o consumidor torna-se mais fácil utilizar um sistema de monitorização que seja fácil de instalar, com um preço acessível e que seja fácil de utilizar. Actualmente, existem diversos sistemas deste tipo sendo por isso bastante acessíveis à grande maioria da população. Apesar de serem mais simples que os contadores inteligentes, apresentam uma taxa de fiabilidade elevada, pelo que se apresentam como uma solução para monitorizar os consumos energéticos e consequentemente melhorar a eficiência energética de um dado local.

Este tipo de sistemas designa-se habitualmente por contador de energia doméstico (*Home Energy Monitor*) e têm como único objectivo ajudar o consumidor a controlar e reduzir os seus consumos. Estes dispositivos têm normalmente dimensões reduzidas pelo que a sua portabilidade se encontra garantida. Dependendo do nível de sofisticação e consequentemente do preço, este tipo de sistemas pode comunicar com um computador através de um cabo USB, através de comunicação sem fios ou mesmo enviar os dados pela internet permitindo assim uma monitorização à distância. O tipo de dados enviados depende mais uma vez do tipo de sistema em questão.

### 3.3.1 Constituição e funcionamento

De um modo geral um sistema de monitorização de energia eléctrica é geralmente constituído pelos seguintes componentes:

- Circuito integrado capaz de medir os diversos dados de energia;
- Sensores utilizados na leitura dos sinais analógicos de tensão e corrente;
- Memória para armazenar os registos históricos dos consumos de energia;
- Visor que disponibiliza, em tempo real, a informação recolhida;
- Microcontrolador.

Na figura 3.1 é possível observar o diagrama de blocos típico de um sistema de monitorização.

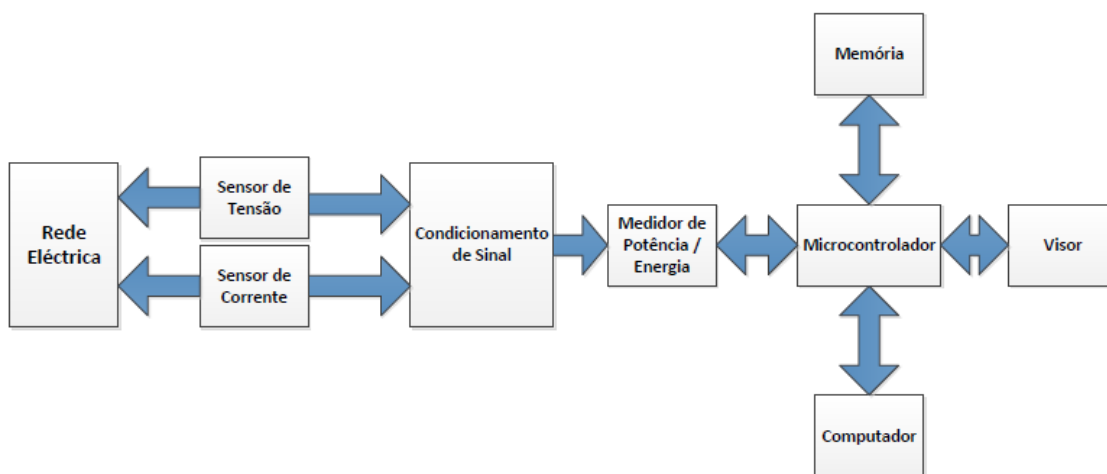


Figura 3.1 – Diagrama de blocos de um sistema de monitorização

As leituras de corrente e de tensão são geralmente realizadas através de um divisor resistivo ou através da utilização de um transformador de medida. Os sinais de corrente e tensão obtidos são posteriormente analisados e processados por um circuito integrado, denominado de medidor de potência. Os dados apresentados ao utilizador dependem da capacidade de processamento do microcontrolador e do medidor de potência. O medidor de potência é geralmente responsável por realizar o cálculo de diversos parâmetros, tais como a potência, a energia e os valores eficazes de corrente e tensão. Alguns sistemas mais complexos, permitem ainda o cálculo do factor de potência, da potência activa e da potência reactiva. O microcontrolador é habitualmente utilizado para o cálculo de funções matemáticas mais complexas, tais como os custos energéticos associados ao consumo de electricidade.

### 3.3.2 Exemplos de sistemas de monitorização de energia

Existem sistemas de monitorização capazes de medir os consumos de apenas um equipamento eléctrico e outros capazes de medir os consumos totais de electricidade realizados numa habitação ou indústria.

#### Monitorização ao nível do quadro eléctrico

Uma das formas de medir os consumos totais de electricidade é utilizar um sistema de monitorização energética constituído por sensores de corrente, normalmente transformadores de corrente de núcleo abrível (*split-core*), que podem ser ligados a um dos circuitos do quadro eléctrico. Este tipo de sensores é geralmente utilizado neste tipo de medições pois não é necessário interromper o circuito para proceder à sua instalação e permitem a medição de correntes na ordem das centenas de amperes, dependendo do sensor utilizado. A complexidade deste tipo de sistemas é variável, pois alguns são constituídos por um único dispositivo responsável por medir e disponibilizar num pequeno visor as leituras realizadas, enquanto outros mais complexos, mas no entanto mais potentes, são constituídos por dois dispositivos. No caso dos sistemas mais complexos, os dois dispositivos comunicam entre si, geralmente recorrendo à comunicação sem fios. Um dos dispositivos efectua a leitura e transmissão dos dados a um outro dispositivo, normalmente portátil, que disponibiliza os dados recebidos num visor, podendo posteriormente enviar os mesmos para um computador.

Este tipo de dispositivos permite monitorizar o consumo total de energia eléctrica a partir de um quadro eléctrico. No entanto, estes sistemas são caros e o seu manuseamento, mais especificamente a instalação do mesmo junto do quadro eléctrico, requer cuidados adicionais devido aos elevados valores de corrente aí presentes.

De seguida são apresentados alguns sistemas de monitorização habitualmente utilizados para uma monitorização ao nível do quadro eléctrico.

- C.A 8332b

O C.A 8332b, ilustrado na Figura 3.2, é desenvolvido pela empresa francesa Chauvin Arnoux. Este dispositivo é capaz de ler valores de tensão e corrente e disponibiliza a informação num visor LCD a cores.



Figura 3.2 – Sistema de monitorização da Chauvin Arnoux (Chauvin Arnoux, 2008)

Este sistema é bastante complexo sendo capaz de monitorizar em tempo real a forma de onda de quatro tensões e quatro correntes. O C.A 8332b consegue medir o valor eficaz da tensão e da corrente, a frequência, a potência activa, a potência reactiva e a potência aparente bem como os valores por fase. Este sistema permite ainda calcular os consumos totais de cada uma das diferentes potencias, calcular o factor de potência, o *flicker* e distorção harmónica total (DHT). A informação disponibilizada no visor LCD pode ainda ser gravada sobre a forma de *screenshots* (imagens e dados) e pode ser exportada para um computador. Este sistema é vendido com um *software* que permite a recuperação de dados e a comunicação com um computador em tempo real.

O C.A 8332b foi desenvolvido a pensar em instalações com tensões até 960 V e correntes até 6500 A. Devido a todas as suas funcionalidades e capacidades de leitura e análise da rede eléctrica o C.A 8332b apresenta um preço bastante elevado na ordem dos 1800 € (Chauvin Arnoux 2008).

- Fluke 435 Series II

O Fluke 435 Series II, ilustrado na Figura 3.3, é desenvolvido pela empresa Fluke e à semelhança do C.A 8332b é constituído por um único dispositivo com um visor LCD a cores.



Figura 3.3 – Sistema de monitorização da Fluke (Fluke, 2012)

O Fluke 435 Series II é capaz de medir tensões até 1000 V e correntes até 6000 A. As medições de tensão são realizadas recorrendo a pinças crocodilo e as medições de corrente são realizadas recorrendo a sondas de corrente *split core*.

O Fluke 435 Series II consegue medir o valor eficaz de corrente e tensão, a frequência, a potência activa, a potência aparente, a potência reactiva, o factor de potência, o *flicker*, as harmónicas e inter-harmónicas bem como a distorção harmónica total, sendo que todas estas medições apresentam um erro de medição inferior a 1 %. O Fluke vem equipado com um cartão de memória de 8 GB e com um programa de computador para analisar os dados recolhidos. O preço de venda do Fluke 435 Series II é na ordem dos 4500 € (Fluke, 2012).

- Elite Classic 1.0

O Elite Classic 1.0, ilustrado na Figura 3.4, é produzido pela empresa britânica Efergy. É constituído por um sensor de corrente, um transmissor sem fios e um módulo de visualização (monitor).



Figura 3.4 – Sistema de monitorização Elite (Efergy, 2009)

Este sistema tem a portabilidade como vantagem, pois o seu transmissor tem um alcance de 40 metros a 70 metros, o que permite uma maior mobilidade ao seu utilizador. Ao contrário dos sistemas anteriores, que possuíam programas de computador para analisar aos dados recolhidos, no Elite todos os dados e gráficos são analisados unicamente no monitor, sendo o mesmo capaz de guardar os dados recolhidos durante 2 anos.

A transmissão de dados ocorre a cada 6 segundos e o Elite é capaz de medir tensões de 110 V a 440 V e correntes até 95 A, pelo que o utilizador tem acesso a diversas informações sobre os consumos energéticos, tais como, potência, energia, custos e emissões de  $CO_2$ . Contudo este sistema apresenta problemas de exactidão no que diz respeito ao cálculo da potência, visto que apenas lê a corrente e despreza o factor de potência (Efergy, 2009).

A Tabela 3.1 compara os sistemas apresentados de monitorização de energia eléctrica ao nível do quadro eléctrico.

Tabela 3.1 - Resumo dos sistemas de monitorização ao nível do quadro eléctrico

Sistema	C.A 8332b	Fluke 435	Elite
Gama de tensão (V)	6 - 960	1 - 1000	110 - 400
Corrente Máxima (A)	6500	6000	95
Medição do factor de potência	Sim	Sim	Não
Visor	Sim	Sim	Sim
Transmissão sem fios	Não	Não	Sim
Armazenamento de dados	Sim	Sim	Sim
Ligação ao computador	Sim (RS232/USB)	Sim (USB)	Não
Erro de Medição (%)	<1	<1	<10
Preço aproximado (€)	1800	4500	45

#### Monitorização ao nível do contador de indução electromecânico

Uma das formas de monitorizar os consumos é recorrer a um sensor capaz de medir a velocidade de rotação do disco de alumínio existente nos contadores de indução electromecânicos.

Estes sensores são capazes de converter a velocidade de rotação do disco para um consumo de potência equivalente. O disco metálico do contador é accionado através de duas bobinas, sendo que uma delas se encontra ligada de modo a produzir um fluxo magnético proporcional à tensão, enquanto a outra se encontra ligada de modo a produzir um fluxo magnético proporcional à corrente. Os campos das bobinas encontram-se desfasados 90° através da utilização de uma bobina de compensação. Este atrasado introduz uma corrente de Foucault no disco de tal forma que a força exercida sobre o mesmo é proporcional ao produto da tensão com a corrente. Um íman permanente exerce uma força de travagem, sendo que o

equilíbrio das duas forças permite que o disco gire a uma velocidade proporcional à potência utilizada. Devido ao facto de não possuírem sensores que permitam a leitura individual dos valores de tensão e corrente estes sensores limitam-se a calcular a potência activa, a energia e os custos energéticos. Os dados medidos são geralmente transmitidos, através de comunicação sem fios, para um dispositivo portátil que possui um pequeno monitor ou no caso dos dispositivos mais avançados para um computador onde os dados são armazenados, sendo possível mostrar gráficos de consumo.

Contudo, este tipo de sensores apresenta certas limitações, uma vez que nem todos os contadores são iguais, e como tal, podem ocorrer incompatibilidades entre o sensor e o contador. No caso dos sensores mais simples, que não possuem ligação a um computador, não existe o registo de dados pelo que não é possível avaliar os consumos, quer a longo prazo, através de gráficos, quer quando o utilizador se encontra longe do dispositivo.

Estes dispositivos apresentam uma exactidão elevada, no entanto a mesma encontra-se dependente não só do sensor como também do contador de indução instalado. A grande vantagem destes dispositivos é o seu preço baixo, comparativamente com outros sistemas que realizam a monitorização dos consumos totais de electricidade.

O Black & Decker EM100B e o Blue Line Innovations BLI 28000, ilustrados na Figura 3.5, são dois exemplos de sistemas que monitorizam os consumos energéticos com base na leitura da velocidade do contador electromecânico. A gama Blue Line dispõe de dispositivos com e sem ligação a um computador através de comunicação sem fios (PC-WiFi).



Figura 3.5 – Sistema de monitorização Black & Decker e Blue Line

A Tabela 3.2 compara os sistemas apresentados para monitorização dos consumos de energia ao nível do contador de indução.



Tabela 3.2 – Resumo dos sistemas de monitorização ao nível do contador electromecânico

Sistema	EM100B	BLI 28000	BLI 28000 + PC-WiFi
Resolução de potência (W)	100	100	100
Leitura Mínima de Potência (W)	300	-	-
Factor de Potência (introduzido pelo utilizador)	Sim	Não	Não
Visor	Sim	Sim	Sim
Transmissão sem fios	Sim	Sim	Sim
Armazenamento de dados	Não	Não	Sim
Ligação ao computador	Não	Não	Sim
Erro de medição (%)	<2	<1	<1
Preço aproximado (€)	70	80	250

### Monitorização ao nível do equipamento eléctrico

Os sistemas mais simples que medem os consumos energéticos ao nível do equipamento eléctrico são geralmente denominados sistemas *plug-in*, e encontram-se instalados entre a tomada eléctrica e o equipamento cujos consumos se pretendem monitorizar. Normalmente são equipamentos pequenos, com dimensões comparáveis às tomadas, constituídos por um visor e um botão que permite alterar a informação apresentada no visor. No entanto, existem também equipamentos, que não possuindo visor enviam os dados através da comunicação sem fios, directamente para um posto de recolha de dados que pode ser um computador ou qualquer outro dispositivo electrónico, como por exemplo um telemóvel. Os sistemas *plug-in* são capazes de ler os sinais de tensão e corrente e de medir e calcular a potência, a energia, a frequência da rede e os custos energéticos.

Os sistemas *plug-in* são geralmente baratos, fáceis de instalar e utilizar quando comparados com os sistemas de monitorização mais complexos ao nível do quadro eléctrico e do contador de indução electromecânico. No entanto, são dispositivos que apresentam limitações pois, fornecem somente os consumos energéticos dos equipamentos que a ele se encontram ligados. Para se ter uma visão geral de um sistema seria necessário instalar um sistema *plug-in* em cada tomada o que seria dispendioso.

De seguida são apresentados alguns dos diversos sistemas de monitorização do tipo *plug-in* existentes no mercado.

- Efergy Energy Monitor Socket 2.0

O Efergy Energy Monitor Socket 2.0, ilustrado na Figura 3.6, é desenvolvido pela empresa Efergy. É um equipamento pequeno e que permite calcular até 7 parâmetros diferentes, tais como, a potência, os valores eficazes de corrente e tensão, a frequência, o factor de potência, a energia e os custos energéticos. O seu visor permite apresentar até três tipos de dados em simultâneo. O Efergy Monitor permite guardar os registos dos consumos por dia, por mês e por ano (Efergy, 2009).



Figura 3.6 – Sistema de monitorização *plug-in* da Efergy (Efergy, 2009)

- Belkin Conserve Insight

O Belkin Conserve Insight, ilustrado na Figura 3.7, é um sistema desenvolvido pela empresa Americana Belkin. À semelhança do Efergy Energy Monitor, possui um visor onde são disponibilizados os diversos dados medidos, sendo que, no entanto, só disponibiliza um dado em simultâneo ao contrário do Efergy que permitia visualizar até três.



Figura 3.7 – Sistema de monitorização *plug-in* da Belkin (Belkin, 2011)

O dispositivo Belkin é um dispositivo simples, composto somente por três botões e limita-se a apresentar ao utilizador os consumos, as emissões de CO<sub>2</sub> e os custos energéticos (Belkin, 2011).

- WPM03 Wireless Energy Meter

O WPM03, ilustrado na Figura 3.8, é um sistema bastante mais prático que os sistemas anteriores pois é constituído por três dispositivos *plug-in* e uma consola central que recebe via comunicação sem fios os dados obtidos por cada um dos dispositivos, sendo o seu alcance de aproximadamente 30 metros



Figura 3.8 – Sistema de monitorização *plug-in* com *wireless* da WPMP (Doss, 2011)

O WPM03 permite calcular os valores eficazes de tensão e corrente, emissões de CO<sub>2</sub>, a potência e o consumo energético associado a cada um dos dispositivos, bem como a energia e o custo energético total. Além das funcionalidades normalmente associadas a um sistema de monitorização de energias, o WPM03 permite ainda medir a temperatura e a humidade (Doss, 2011).

A Tabela 3.3 compara os sistemas apresentados para a monitorização de consumos de energia ao nível do equipamento eléctrico.

Tabela 3.3 – Resumo dos sistemas de monitorização ao nível do equipamento eléctrico

Sistema	Efergy Socket 2.0	Belkin Conserve Insight	WPMP03
Gama de Tensão (V)	170 - 276	120 - 276	190 - 276
Corrente Máxima (A)	16	15	10
Medição do factor de potência	Sim	Não	Não
Visor	Sim	Sim	Sim
Transmissão sem fios	Não	Não	Sim
Armazenamento de dados	Sim	Não	Sim
Ligação ao computador	Não	Não	Não
Erro de medição (%)	<2	-	<1
Preço aproximado (€)	25	35	40

## 4 - Projecto do Sistema de Monitorização

Este capítulo incide sobre as diversas fases de projecto do sistema de monitorização, sendo as mais relevantes a estrutura geral do sistema, a selecção e dimensionamento dos componentes, a programação do microcontrolador e o desenvolvimento de *software* auxiliar.

### 4.1 Descrição do Sistema

No decorrer deste trabalho foi projectado e implementado um sistema de monitorização de energia eléctrica com o objectivo de analisar não só os consumos mas também a qualidade de energia eléctrica na rede, ajudando deste modo o utilizador a ter uma maior percepção dos seus consumos e ajudando-o a diminuir a sua pegada ecológica.

O sistema em causa é capaz de medir e calcular em tempo real diversos dados de energia, tais como, a potência activa, a potência aparente, o valor eficaz da tensão e da corrente, o factor de potência, a frequência e ainda factores relacionados com a qualidade da energia eléctrica na rede como a distorção harmónica total e a forma de onda, sendo que estes últimos são obtidos após processamento dos dados. Na Figura 4.1, é possível observar o sistema desenvolvido.

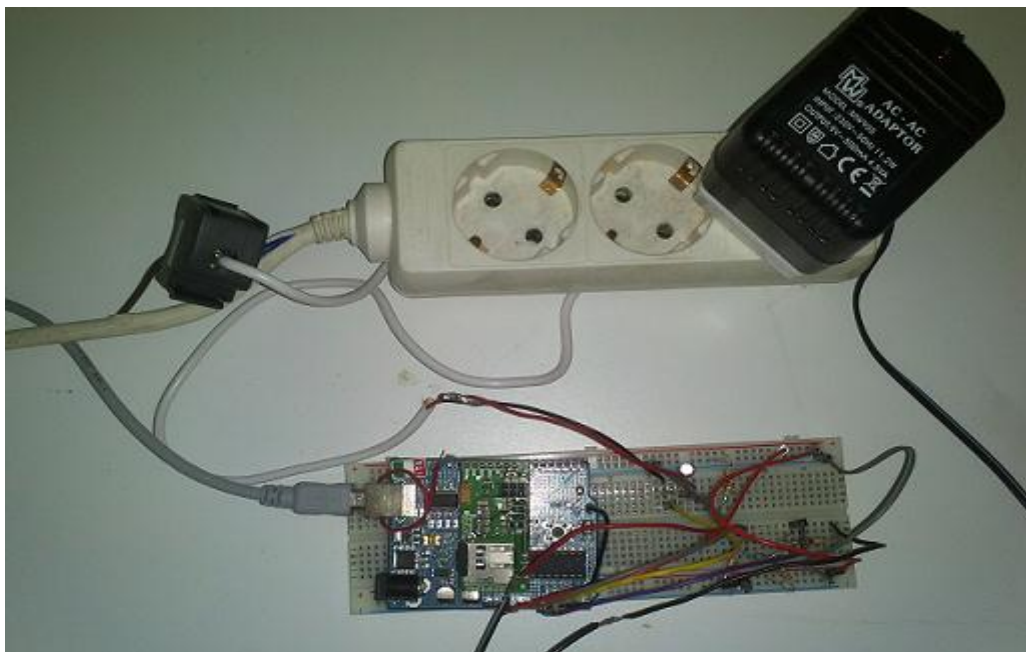


Figura 4.1 – Vista de cima do sistema de monitorização

Numa primeira aproximação ao projecto pretendia-se efectuar um sistema de monitorização que permitisse a obtenção, o processamento e o envio dos diversos dados, em tempo real, para um computador através de uma ligação USB, onde se procederia à sua leitura e à realização instantânea de gráficos dos diversos dados recolhidos, processados e enviados por parte do microcontrolador. Verificou-se no entanto, que o programa utilizado para a realização instantânea de gráficos, o Matlab, possuía limitações relativas à velocidade de

leitura dos dados que chegavam ao computador através da porta USB. Ou seja, a velocidade de leitura dos dados era inferior à velocidade de envio o que originava uma perda significativa de dados. Tentou-se solucionar o problema recorrendo à implementação de outros programas que realizassem a leitura dos dados mais rapidamente, sendo que os resultados obtidos não foram satisfatórios pois a capacidade de processamento necessária para a realização de leitura e escrita (geração de gráficos) dos dados em tempo real é muito elevada o que mais uma vez resultava na perda significativa de dados.

Uma segunda abordagem foi recorrer ao envio diferido de valores medidos, em que se pretendia capturar diversos valores digitais de tensão, provenientes do sinal analógico variável no tempo, mantê-los guardados na memória do Arduino por um determinado período de tempo e enviá-los posteriormente para o computador a uma velocidade mais reduzida que permita uma correcta amostragem dos dados. No entanto esta aproximação revelou dois problemas distintos, o primeiro encontrava-se relacionado com a limitada capacidade de memória do Arduino o que não permitia a obtenção de um conjunto de dados significativos. O segundo, encontrava-se relacionado com limitações de velocidade e processamento do Arduino, sendo que quando este se encontrava a enviar o conjunto valores armazenados em memória para o computador, a sua capacidade de escrita de novos valores em memória encontrava-se limitada, quer por falta de espaço, quer por falta de capacidade de processamento para estar a enviar e a ler dados em simultâneo. Os gráficos obtidos perdiam deste modo a sua amostragem em tempo real bem como resolução pois no caso da amostragem dos sinais de tensão e corrente instantâneas as ondas resultantes eram rectângulos e não sinusóides como seria expectável. Tendo em conta que neste projecto se pretende também realizar um estudo sobre a qualidade da forma de onda na rede e a distorção harmónica introduzida pelos diversos aparelhos eléctricos a obtenção de gráficos rectangulares viria a inviabilizar uma análise correcta relativamente à influência dos diversos aparelhos pelo que os estudos relacionados com a qualidade de energia se encontravam seriamente comprometidos.

Analisando os resultados obtidos pelas duas abordagens anteriores optou-se por realizar um sistema no qual os dados são previamente guardados, ou num cartão de memória, microSD, acoplado ao microcontrolador ou enviados através de uma ligação USB para o computador onde posteriormente serão gravados num ficheiro de texto. Deste modo a realização dos diversos gráficos só ocorre após a gravação dos dados. É no entanto possível realizar a visualização numérica em tempo real, dos dados como a potência activa, a potência aparente, o valor eficaz da tensão e da corrente, o factor de potência e a frequência da rede calculados pelo Arduino. Os dados referentes aos valores instantâneos de tensão e corrente são analisados apenas recorrendo a realização de gráficos. O volume de dados gravados encontra-se limitada pela capacidade do cartão de memória, do disco rígido ou pelo tempo escolhido pelo utilizador para a gravação dos mesmos.

Uma característica inovadora desde sistema, como referido anteriormente, é o facto de permitir a gravação de dados directamente num cartão de memória, o que faz com que não seja necessário ter um programa a correr no computador e a ocupar a memória do mesmo.

Esta é uma grande vantagem quando se pretende avaliar uma rede eléctrica por um elevado período de tempo, sendo o estudo dos dados realizado posteriormente à sua obtenção. De acordo com a norma EN 50160 o estudo da qualidade da tensão da rede deve ser realizado através da obtenção de dados pelo período mínimo de 7 dias, pelo que o cartão de memória se revela como uma opção útil e viável.

Outra característica deste sistema é a sua capacidade de monitorizar não só um determinado equipamento eléctrico, como também um circuito de um quadro eléctrico de uma habitação ou indústria.

Esta vantagem permite ao utilizador obter uma informação detalhada sobre os consumos e as influências na qualidade de energia de um conjunto de equipamentos (circuito de iluminação, grupo de motores, etc.) ou de equipamentos eléctricos individuais (televisões, computadores, frigoríficos, etc.). É deste modo possível compreender e analisar qual o peso e a influência específica de cada equipamento, ou conjunto de equipamentos, na qualidade e nos gastos de energia eléctrica.

Com o objectivo de permitir ao utilizador uma melhor percepção e visualização dos dados obtidos foi desenvolvida uma pequena aplicação, para computador, que permite a criação de gráficos a partir dos dados obtidos.

## 4.2 Estrutura Geral do Sistema

Como referido anteriormente, o sistema de monitorização é constituído por um dispositivo de aquisição de dados, que recebe sinais analógicos de corrente e tensão, de um equipamento, conjunto de equipamentos ou quadro eléctrico, cujos consumos ou influências na qualidade de energia se pretendem monitorizar, e envia esses dados ou para o computador através de uma porta USB ou para um cartão de memória, que será posteriormente analisado recorrendo a um computador juntamente com o *software* desenvolvido para visualização de dados. Na Figura 4.2 é possível observar o diagrama de blocos geral do sistema de monitorização. É possível verificar a existência de um caminho opcional representado pela seta a tracejado.

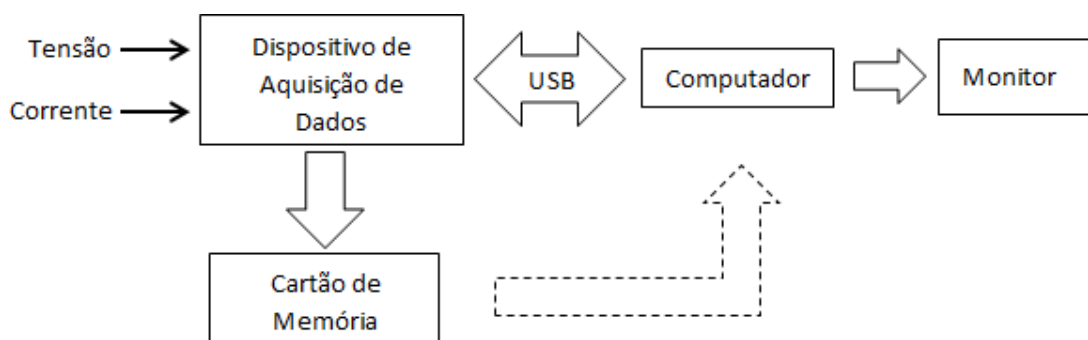


Figura 4.2 – Diagrama de blocos geral do sistema. A tracejado - utilização facultativa.

#### 4.2.1 Dispositivo de aquisição de dados

A implementação do dispositivo de aquisição de dados foi realizada através da divisão do mesmo em quatro partes fundamentais: o sensor de tensão (transformador de tensão), o sensor de corrente (transformador de corrente), o condicionamento de sinal e o microcontrolador. No decorrer deste capítulo serão detalhadas as implementações de cada um destes blocos, com a caracterização e descrição do seu funcionamento. A Figura 4.3 ilustra o diagrama de blocos do dispositivo de aquisição de dados.

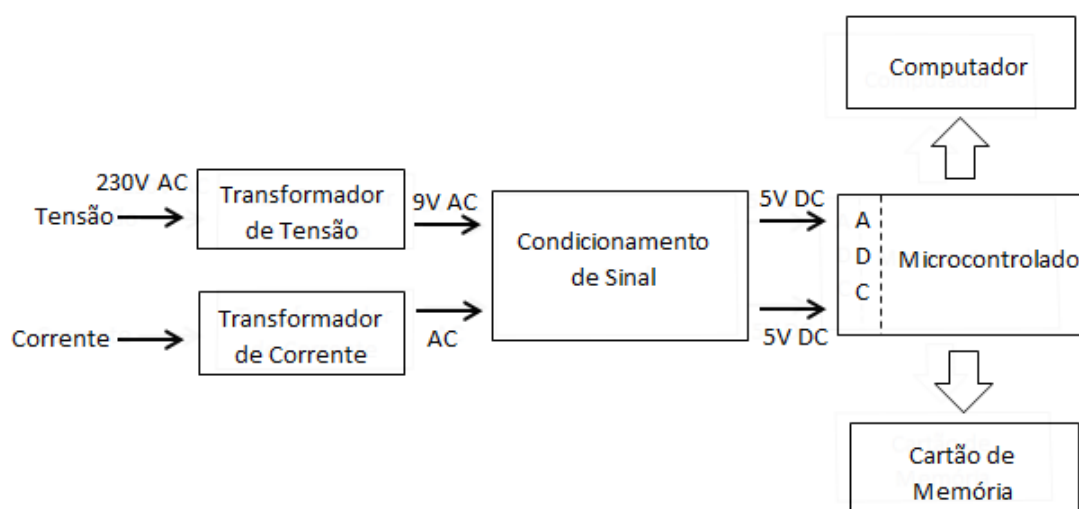


Figura 4.3 – Diagrama de blocos para aquisição de dados

O dispositivo de aquisição de dados começa por ler os sinais de tensão e corrente da rede eléctrica recorrendo a sensores adequados, tais como, um transformador de tensão e um sensor de corrente. Os sinais depois de lidos são condicionados, de forma a ajustá-los aos níveis de tensão exigidos pelo microcontrolador em causa. No caso da tensão, o primeiro condicionamento de sinal ocorre recorrendo a um transformador de 9 V. A utilização de um transformador garante uma maior segurança, evitando-se deste modo trabalhar com tensões elevadas. Posteriormente o sinal de tensão à saída do transformador e o sinal de corrente à saída do sensor de corrente do tipo transformador de corrente *split core* passam por um condicionamento de sinal, composto por divisores resistivos, de forma a ajustá-los aos valores recomendados para um bom funcionamento do microcontrolador.

O microcontrolador recebe os sinais, filtra-os, adquire amostras digitais deles e calcula os dados de energia, tais como o valor eficaz da tensão e corrente, factor de potência, potência activa, potência aparente e frequência. Essa informação como referido anteriormente, é verificável na Figura 4.3, pode ser enviada para o cartão de memória ou directamente para o computador.



O microcontrolador permite ainda enviar para o computador os valores instantâneos da tensão e da corrente, podendo deste modo efectuar-se uma análise à qualidade da energia da rede, tendo-se acesso às formas de onda de ambos os sinais.

Como é possível verificar, a tensão dos sinais recebidos pelo dispositivo de aquisição de dados (microcontrolador) encontra-se regularizada para um máximo de 5 V, e foi obtida através da transformação e rectificação dos sinais recebidos da rede eléctrica. O condicionamento dos sinais encontra-se explicado nos capítulos seguintes. É no entanto necessário ter em conta que, através do uso de divisores resistivos e do sensor de corrente, transformou-se um sinal de corrente num sinal de tensão, procedimento necessário de modo a obter-se um sinal de leitura válido por parte do microcontrolador. A alimentação do Arduino, neste caso específico, é realizada através de um cabo USB ligado directamente ao computador. Uma outra hipótese é realizar a alimentação do Arduino recorrendo a uma bateria.

#### 4.2.2 Visualização de dados

A visualização gráfica dos dados, como referido anteriormente, é realizada recorrendo a um computador e a uma aplicação desenvolvida em Matlab implementada para o efeito. Os dados podem ainda ser visualizados em forma de lista e em tempo real recorrendo a programas tipicamente chamados de *Serial Monitors* ou terminais que se destinam a ler a informação recebida nas portas série do computador mais especificamente as portas USB.

No decorrer deste trabalho foi utilizado um programa gratuito, o RealTerm<sup>1</sup>, ilustrado na Figura 4.4, o qual foi utilizado para visualizar os dados de energia em tempo real e para gravar os dados referentes aos valores instantâneos de tensão e corrente.

---

<sup>1</sup> <http://realterm.sourceforge.net/>

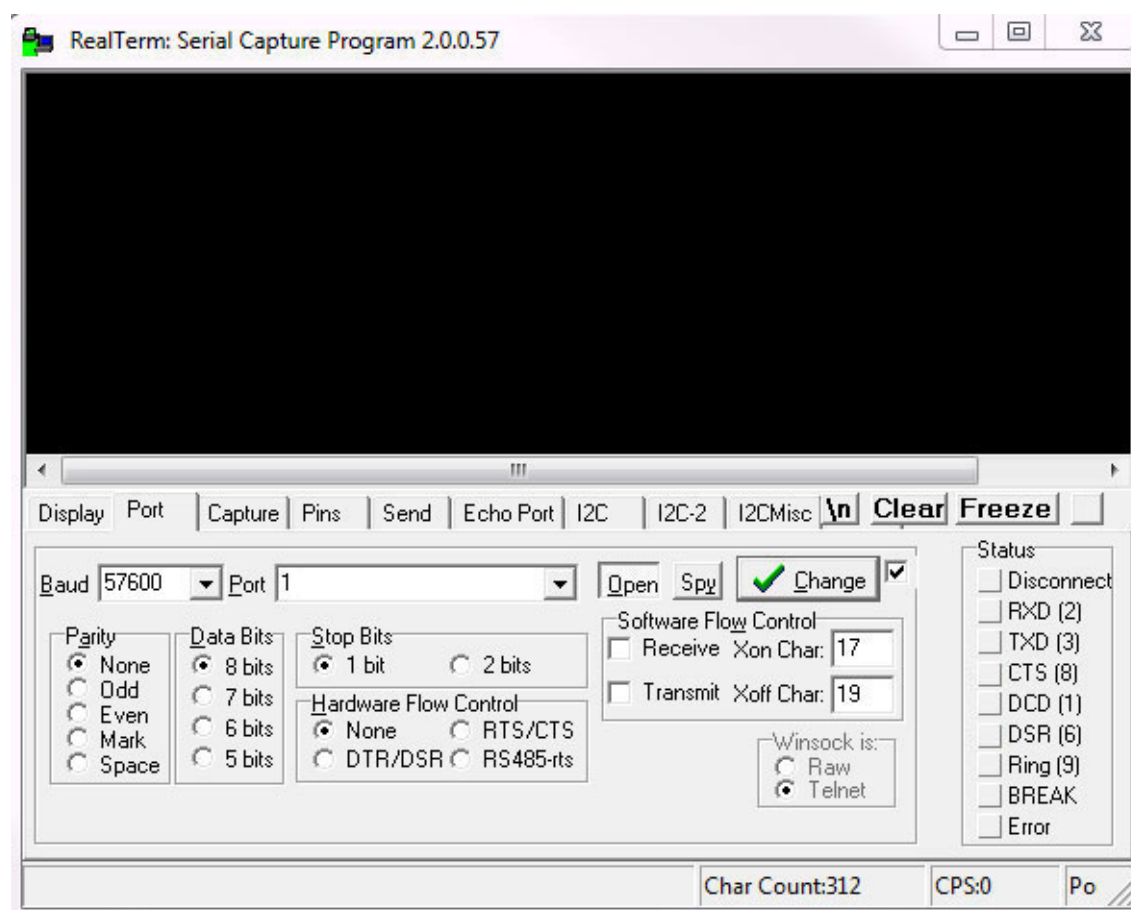


Figura 4.4 – Interface gráfica do RealTerm

A necessidade de utilizar um programa para ler a porta USB advém do facto das limitações de velocidade existentes relativas à escrita de dados num cartão de memória.

Sendo a frequência fundamental da rede eléctrica em Portugal de 50 Hz, equivalente a um período de onda de 20 ms é necessário, de acordo com o teorema de Nyquist, que a frequência de amostragem de um sinal analógico seja maior ou igual a duas vezes a maior frequência do espectro desse sinal (digamos, a 10ª harmónica) de modo a que o sinal resultante possua a menor perda de dados possível. A gravação de dados com uma frequência tão elevada torna-se impossível de realizar recorrendo a um cartão de memória, pois este não tem capacidade para suportar velocidades tão elevadas o que origina uma elevada quantidade de dados perdidos ou ilegíveis. A gravação de dados a tão alta velocidade para o cartão de memória influencia também a capacidade de processamento do microcontrolador pois este estaria a realizar acções simultâneas de escrita e leitura.

Recorrendo ao programa de monitorização das portas série, o microcontrolador encontra-se simplesmente a ler e a enviar os dados via USB, dados esses que serão posteriormente gravados num ficheiro de texto com o auxílio das capacidades de processamento do próprio computador.

## 4.3 Hardware

Neste subcapítulo são apresentados os principais componentes electrónicos utilizados na construção do sistema de monitorização, nomeadamente o microcontrolador, o sensor de corrente e o transformador, bem como o condicionamento de sinal realizado de modo a ter em conta as especificações do microcontrolador.

### 4.3.1 Microcontrolador

O microcontrolador é normalmente designado como computador de um só chip, composto por um processador, memória e periféricos de entrada e saída. Os microcontroladores contêm geralmente um microprocessador de 8 bits programável e capaz de desempenhar funções específicas.

No caso concreto deste trabalho foi proposta a criação de um sistema de monitorização recorrendo especificamente ao microcontrolador Arduino.

Deste modo o controlo é então realizado digitalmente utilizando um Arduino Uno. O Arduino é um dispositivo *open-source*, projectado com um microcontrolador ATmel AVR de 8 bits. No caso concreto do Arduino Uno, o *chip* utilizado pertence à série megaAVR e trata-se mais concretamente do chip ATmega 328. O Arduino possui um ambiente de desenvolvimento de *software* próprio o que facilita a escrita de programas no microcontrolador. Este microcontrolador pode ser utilizado para desenvolver uma série de objectos interactivos, tendo em conta que as suas entradas podem ter como *inputs* uma vasta variedade de sensores ou interruptores e permitem o controlo de luzes, motores e outros componentes físicos.

A plataforma de *software* utilizada foi desenvolvida pela Arduino e tem o nome de Arduino IDE. O Arduino IDE é uma aplicação multiplataforma escrita em Java a qual é derivada de dois projectos com os nomes de *Processing* e *Wiring*.

Como já referido, o Arduino inclui um editor de código próprio, com recursos de realce de sintaxe, parênteses correspondentes e indentação automática, sendo capaz de compilar e carregar programas para a placa sem a necessidade de editar *makefiles* ou correr outro tipo de programas. Este carregamento é realizado recorrendo a um *bootloader* (pequeno programa que coloca um programa em memória) que vem pré-programado no Arduino, facilitando assim o carregamento de programas para o *chip* de memória *flash* embutido no Arduino.

O Arduino IDE vem com uma biblioteca de funções em C/C++ chamada *Wiring*, proveniente do projecto com o mesmo nome, que torna os comandos de entrada e saída muito mais fáceis. Os programas em Arduino são geralmente escritos em C++, sendo que os *chips* AVR encontram-se programados em C. Na Figura 4.5, encontra-se representado o microcontrolador Arduino Uno, utilizado neste trabalho.

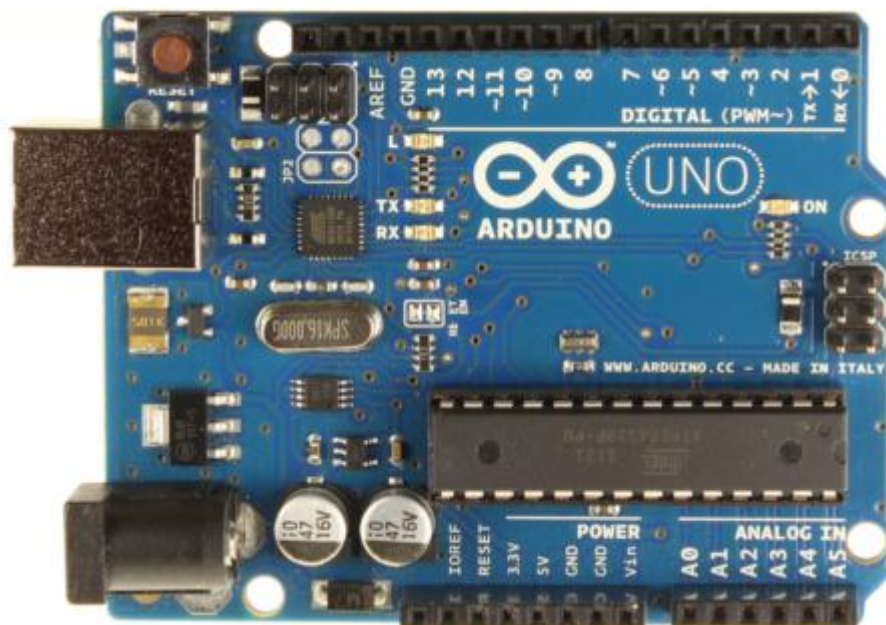


Figura 4.5 – Arduino Uno (vista de cima) (Arduino,2011)

Existem diversos tipos de Arduino, com diferentes capacidades de processamento e características. O Arduino Uno dispõe de 14 pins digitais de entrada/saída, 6 pins analógicos de entrada, um oscilador de cristal com uma frequência de 16 MHz, uma ligação USB, uma tomada para alimentação externa, uma entrada ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) e um botão de *reset*. A placa Arduino contém tudo o que é necessário para suportar o microcontrolador ATmega328, bastando para tal conectá-la a um computador através de um cabo USB, ou liga-lo a um transformador AC-DC, ou uma bateria para que esta comece a trabalhar. Na Tabela 4.1 encontra-se um resumo das características do microcontrolador Arduino (Arduino, 2011).

Tabela 4.1 – Resumo das características do Arduino

Microcontrolador	ATmega328
Tensão de Serviço	5 V
Tensão de Entrada (recomendada)	7 – 12 V
Tensão de Entrada (limites)	6 – 20 V
Pins Digitais de Entrada/Saída	14 (das quais 6 fornecem saída PWM)
Pins Analógicos de Entrada	6
Corrente DC por pin de Entrada/Saída	40 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega328) dos quais 0.5KB utilizados pelo <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade do Relógio	16 MHz

Como é possível verificar na Tabela 4.1, a placa pode operar com um fornecimento externo de 6 a 20 V. Contudo se o fornecimento de tensão for inferior a 7 V o pin de 5 V existente na placa pode fornecer uma tensão inferior aos 5 Volts padrão, o que pode ter como consequência o mau funcionamento do sistema. No entanto, se o fornecimento de tensão for superior a 12 V, o controlador de tensão pode sobreaquecer e danificar o regulador.

A placa dispõe de diversos pins de alimentação sendo eles:

- VIN: é possível alimentar o Arduino directamente através deste pin, recorrendo a uma fonte de alimentação externa, ou caso a alimentação seja feita com um transformador, é possível obter à saída deste pin a tensão de alimentação que se encontra a ser fornecida pelo transformador.
- 5 V: a partir deste pin é possível obter uma tensão de 5 V, regulada através de um regulador linear, existente na placa.
- 3,3 V: A partir deste pin é possível obter uma tensão de 3,3 V, regulada como no caso do pin de 5 V, por um regulador linear. A corrente máxima é de 50 mA.
- GND: Este pin diz respeito ao pin de terra sendo a sua tensão de 0 V.

Uma das grandes vantagens da utilização do microcontrolador Arduino, comparativamente com outros microcontroladores, é o facto de existir a possibilidade de interligação com outros módulos, conhecidos como *shields*. Estes são placas de circuito impresso, normalmente fixados no topo do Arduino, através de uma conexão alimentada por pins conectores.

A enorme quantidade de *shields* existentes, permite a execução de diversas funções específicas, tais como, manipulação de motores, sistemas de comunicação sem fios, comunicação via Ethernet, gravação de dados em cartão de memória, entre outras funções.

No caso específico deste trabalho, optou-se por utilizar um *shield* que permitisse a gravação de dados para o cartão de memória. Existe uma grande variedade de *shields*, que permitem realizar essa tarefa, e que permitem utilizar uma vasta gama de cartões de memória, sendo que para este trabalho se optou pelo *shield* ilustrado na Figura 4.6, que utiliza um cartão de memória microSD.

Este *shield*, comercializado pela *cooking-hacks*<sup>2</sup>, tem um tamanho relativamente pequeno e pode ser conectado ao Arduino de duas maneiras distintas, sendo elas, através da porta ICSP ou através de ligação SPI (*Serial Peripheral Interface*) que ocorre nos pins digitais 8 e GND do Arduino.

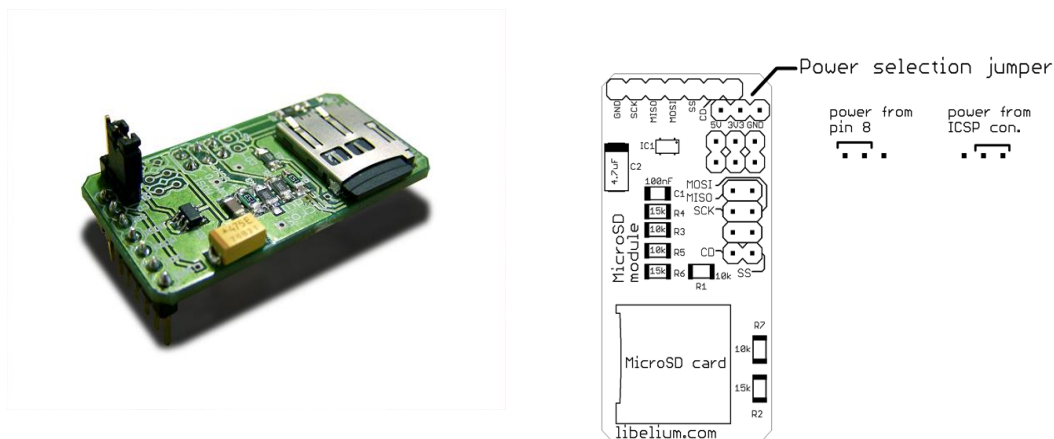


Figura 4.6 – *Shield* para introdução do cartão microSD (cooking-hacks, 2012)

<sup>2</sup> <http://www.cooking-hacks.com/>

Um factor importante a ter em conta é a necessidade de formatação do cartão de memória para o formato FAT16, devido ao facto das bibliotecas de funções existentes serem incompatíveis com outros formatos. Uma das limitações resultantes é o facto de os nomes dos ficheiros não poderem ter mais de oito caracteres e as extensões dos mesmos não poderem ter mais de três caracteres, sendo este formato de nomes de ficheiros conhecido como o formato 8.3. Normalmente, as extensões mais utilizadas são .TXT e .LOG. O esquema final do Arduino com o *shield* encontra-se ilustrado nas Figuras 4.7 e 4.8.

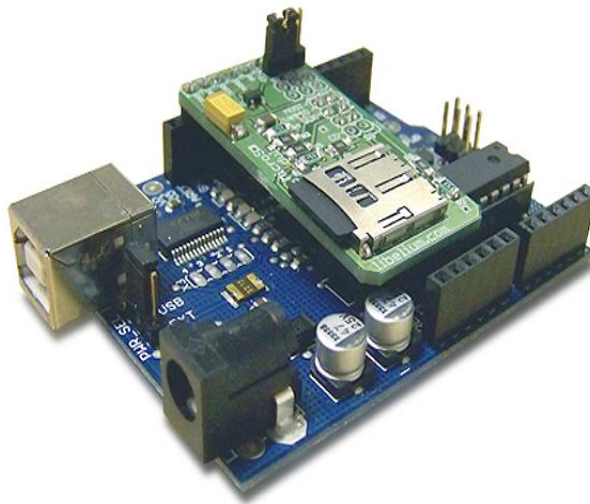


Figura 4.7 – Arduino juntamente com o *shield* do cartão de memória (cooking-hacks, 2012)

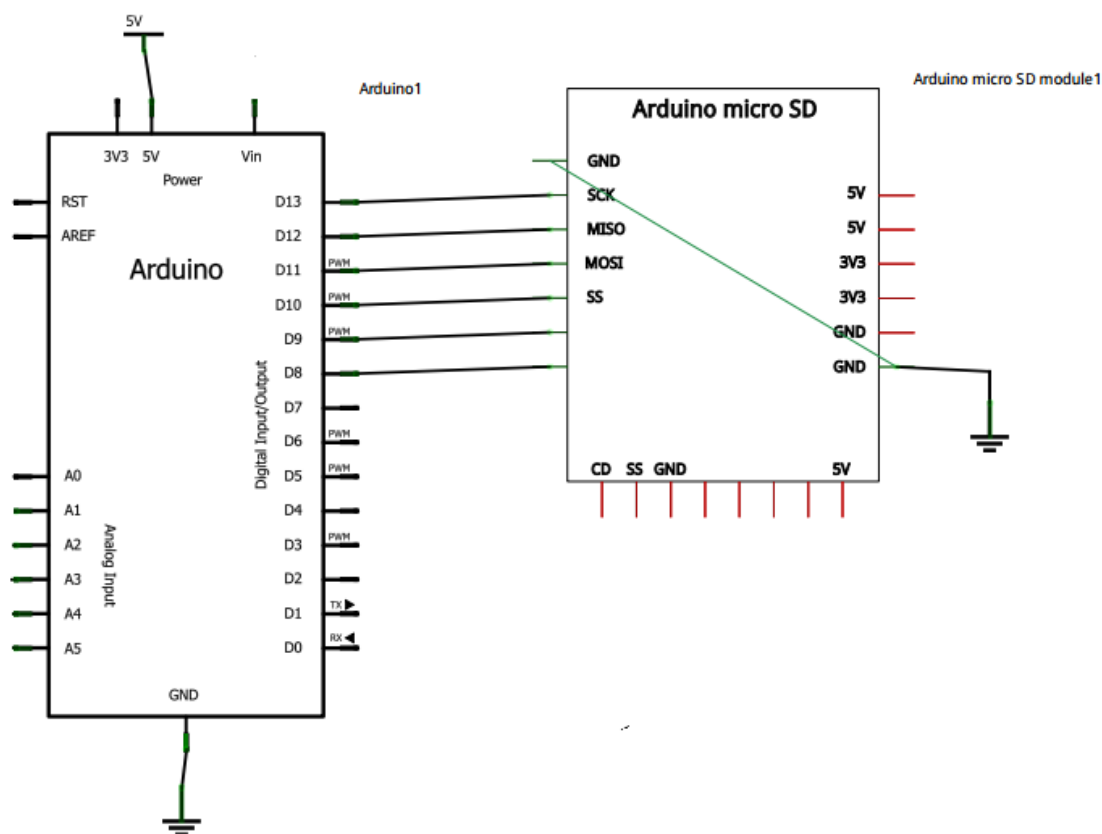


Figura 4.8 – Pormenor de ligação entre o Arduino e o *shield*

#### 4.3.2 Transformador de Corrente (TI)

A leitura de corrente eléctrica é realizada recorrendo a um transformador de corrente (TI) de núcleo abrível (*split core*). Os transformadores de corrente são utilizados para medir corrente alternada (AC). Os sensores deste tipo são extremamente úteis para medir o consumo de energia a partir do quadro eléctrico de um edifício, visto que devido a serem de núcleo abrível (*split core*) não obrigam a interromper o circuito que se está a medir para proceder à sua instalação.

Existe uma grande variedade de transformadores de corrente TI sendo que, no caso específico deste trabalho, a escolha do TI teve em consideração a corrente máxima que se pretende medir, a secção máxima do condutor, a dimensão e o preço do sensor. O transformador de corrente *split core* escolhido para este trabalho, foi o *Jackplug extra sensor* da marca Efergy e encontra-se ilustrado na Figura 4.9. Este sensor tem a capacidade de medir correntes monofásicas alternadas até 100 A.



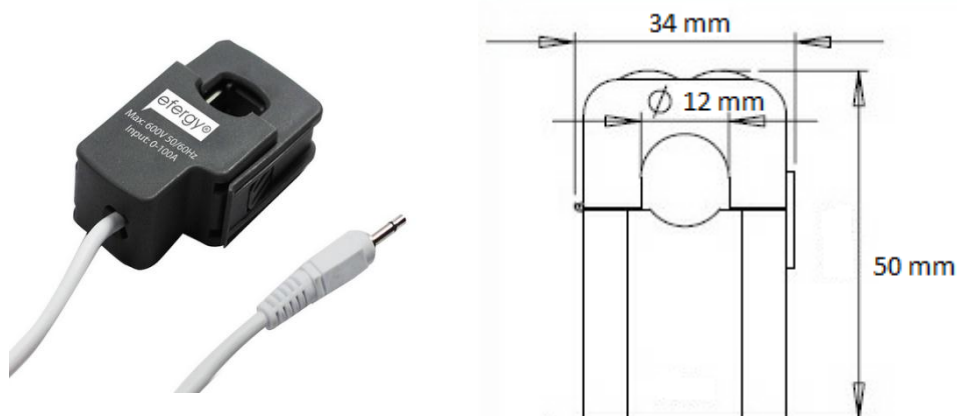


Figura 4.9 – Sensor de corrente (Efergy, 2009) e as suas dimensões

De acordo com os dados da EDP, a grande maioria dos clientes possui uma potência contratada inferior a 13,8 kVA, para uma corrente máxima de 60 A. No entanto, existem habitações e indústrias com potência contratada de 41,4 kVA, com uma corrente máxima de 180 A. No caso dessas instalações, o sensor de corrente escolhido para este projecto não pode ser utilizado para medir as potências e correntes directamente a partir do quadro eléctrico mas somente para medir os consumos e influências energéticas de aparelhos eléctricos individuais ou conjuntos de aparelhos desde que a sua corrente não ultrapasse o limite máximo suportado pelo sensor.

Este factor teve principal influência na escolha e tamanho do sensor. Existem diversos sensores no mercado capazes de medir correntes alternadas superiores a 100 A, sendo que existe a versão XL deste mesmo sensor, capaz de medir correntes até 200 A.

No entanto, quanto maior for a corrente suportada pelo sensor maior será o seu tamanho, nem sempre havendo espaço junto dos quadros eléctricos para proceder à sua instalação. Deste modo a escolha recaiu sobre o sensor *Jackplug extra sensor*, pois é pequeno, prático, mais barato e ideal para utilizar na maioria das habitações e quadros eléctricos.

Um transformador de corrente é um transformador de medida que está em curto-circuito. Devido ao facto de se encontrar em curto-circuito, a tensão no secundário é nula, pelo que a força electromotriz também é praticamente nula. Deste modo o fluxo principal e por consequência a força magnetomotriz, são ambos nulos.

A corrente no circuito secundário é então proporcional à corrente a circular no circuito primário de acordo com a Equação 4.1.

$$I_{\text{secundário}} = I_{\text{primário}} \times N_{\text{espiras}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Sendo que  $N_{\text{espiras}}$ , corresponde ao rácio existente entre o número de espiras no primário e no secundário.

$$N_{\text{espiras}} = \frac{N_{\text{espiras}_{\text{primário}}}}{N_{\text{espiras}_{\text{secundário}}}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

O número de espiras existentes no transformador sensor de corrente escolhido é de 1350, pelo que a corrente existente no secundário é 1/1350 da corrente existente no primário.

Um sensor de corrente precisa de ser utilizado em conjunto com uma resistência de carga ou *burden*, pois somente deste modo é que é completado (fechado) o circuito secundário do sensor de corrente. A resistência de carga é dimensionada de modo a fornecer um sinal de tensão  $U_{\text{out}}$ , que é proporcional à corrente do secundário,  $I_{\text{sec}}$ . Para garantir que o transformador de medida se encontra em curto-circuito é necessário aplicar no secundário uma resistência de carga de muito baixo valor.

Neste tipo de sensores o circuito secundário é galvanicamente isolado do circuito primário. Geralmente é necessário garantir que após instalados os sensores não apresentam um circuito aberto, pois as correntes existentes podem-se tornar potencialmente perigosas. Em circuito aberto e com as correntes a circularem no primário, a corrente no secundário será aproximadamente zero, a tensão no secundário será diferente de zero, sendo que o fluxo deixa de ser nulo, pelo que o núcleo aquece por fenómeno de histerese. Como tal a utilização de um sensor de corrente exige precauções e um bom dimensionamento. Na Figura 4.10, encontra-se representado o circuito eléctrico do sensor de corrente, onde T representa o sensor de corrente e Rb a resistência de carga utilizada no secundário do transformador para produzir uma tensão de saída  $U_{\text{out}}$  proporcional à corrente do secundário,  $I_{\text{sec}}$ .

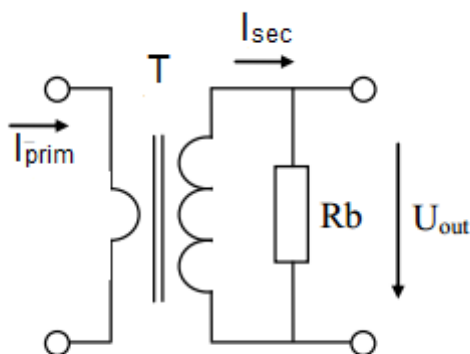


Figura 4.10 – Circuito eléctrico do sensor de corrente

### 4.3.3 Transformador de Tensão (TT)

A leitura da tensão da rede eléctrica foi realizada recorrendo a um transformador ligado directamente à rede eléctrica. Numa primeira fase de projecto e estudo dos componentes a utilizar foi colocada a hipótese de utilizar um transformador PCB (*Printed Circuit Board*), da marca Block-Trafo 12 V AC. Contudo, os ensaios realizados permitiram verificar a existência de saturação do núcleo e um vincado ciclo de histerese pelo que o sinal à saída sai atrasado comparativamente ao sinal à entrada, prejudicando a forma de onda resultante. Na Figura 4.11 encontra-se ilustrado o transformador em questão.

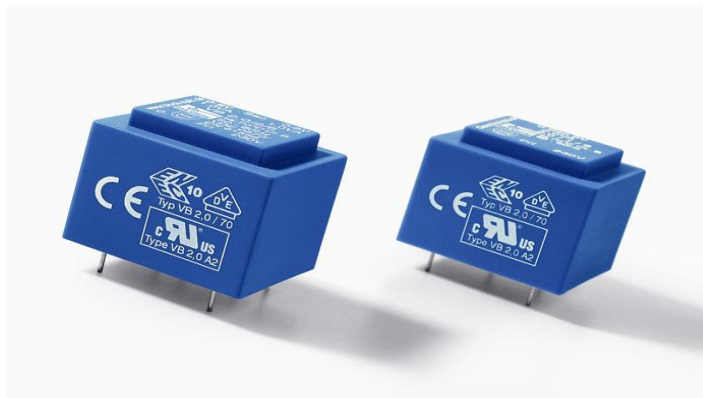


Figura 4.11 – Transformador PCB 12 V AC (Block-Trafo, 2012)

Desde modo optou-se por utilizar um transformador de alimentação como transformador de tensão (TT), sendo que os mesmos podem ter diversas gamas e tensões nominais diferentes. O primeiro passo foi definir qual a gama de tensões do transformador a utilizar, pelo que foi escolhido um transformador de 9 V AC 500 mA da marca MW, e que se encontra ilustrado na Figura 4.12. O transformador em questão foi ensaiado e verificou-se, utilizando um osciloscópio, que não apresenta os problemas do transformador PCB.



Figura 4.12 – Transformador 9 V AC

Este transformador reduz a tensão da rede, 230 V AC para 9 V AC e a utilização do mesmo, como referido anteriormente, permite que a medição dos valores seja realizada de

uma forma segura, sem a necessidade de trabalhar com altas tensões, visto que o mesmo fornece isolamento entre a alta e a baixa tensão AC.

Tal como no caso da medição da corrente o principal objectivo é realizar um condicionamento de sinal e garantir que através do uso de electrónica a tensão enviada para o Arduino se encontra dentro dos requisitos de tensão de entrada exigidos pelos pins analógicos do Arduino, ou seja uma tensão positiva entre 0 V e a tensão de referência do *Analog to Digital Converter* (ADC), sendo esta normalmente de 3,3 V ou 5 V.

A qualidade da forma de onda à saída do transformador depende do tipo de transformador e da qualidade do mesmo. No caso do transformador em questão é possível verificar, na Figura 4.13, que o sinal de saída do transformador é comparável a uma sinusóide pura, pelo que o erro introduzido na qualidade dos dados obtidos é insignificante. Quanto menor for a diferença entre a sinusóide à entrada do transformador e a sinusóide gerada pelo transformador menor serão então os erros de leitura causados pela utilização do mesmo.

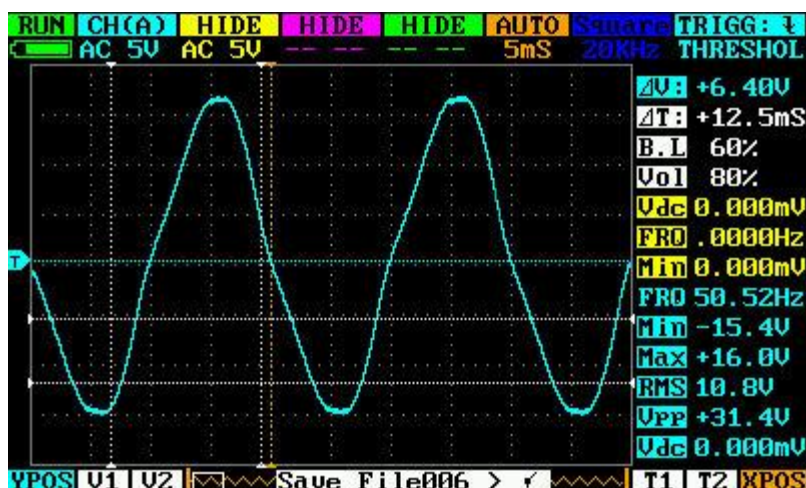


Figura 4.13 – Forma de onda à saída do transformador 9 V AC

Na Tabela 4.2, encontra-se um resumo de dados relativos ao transformador utilizado para este projecto.

Tabela 4.2 – Resumo de dados do transformador 9 V AC

Tensão de Saída	9 VAC
Corrente de Saída	500 mA
Resistência do Primário	700 $\Omega$
Resistência do Secundário	2,4 $\Omega$
Consumo	3,9 W
Fornecedor	MeanWell <sup>3</sup>

<sup>3</sup> <http://www.meanwell.com/>

#### 4.3.4 Condicionamento de Sinal

O condicionamento dos sinais de tensão e de corrente lidos aos níveis exigidos pelo microcontrolador Arduino, foi realizado recorrendo a um transformador e através de divisores de tensão resistivos e de filtros com o objectivo de reduzir o ruído.

##### Condicionamento da tensão

Como referido anteriormente, o sinal de tensão é lido dos 230 V AC da rede eléctrica, sendo que o valor máximo de tensão admitido pelo Arduino é de 5 V. De modo a garantir a segurança e a evitar o uso de tensões elevadas, o primeiro condicionamento de sinal é garantido pelo transformador, efectuando uma redução de 230 V AC à entrada para 9V AC à saída. Sabendo tratar-se de um transformador de 9 V valor eficaz ou *Root Mean Square* (RMS), o pico positivo e o pico negativo de tensão ocorrem influenciados por um factor multiplicativo de raiz de 2, como é possível verificar na Equação 4.3.

$$\begin{aligned}U_{out} &= \sqrt{2} \times 9 V \Leftrightarrow \\U_{out} &= \pm 12,73 V\end{aligned}\tag{Eq. 4.3}$$

Deste modo é necessária a realização de condicionamento de sinal de modo a que a forma de onda resultante tenha um pico de tensão positivo inferior a 5 V e um pico de tensão negativo superior a 0 V, respeitando deste modo as limitações do Arduino.

O condicionamento de sinal de tensão foi dividido em duas etapas:

- 1- Escalonamento da forma de onda;
- 2- Adição de *offset* de modo a impedir a existência de valores negativos.

Recorrendo a um divisor de tensão resistivo entre os terminais do transformador foi possível proceder ao escalonamento da forma de onda, sendo que o *offset*, foi também ele adicionado através da implementação de um outro divisor de tensão ligado aos pinos 5 V e GND do Arduino. Na Figura 4.14 encontra-se ilustrado o circuito eléctrico correspondente e na Figura 4.15 encontra-se representado o esquema de ligação ao Arduino.

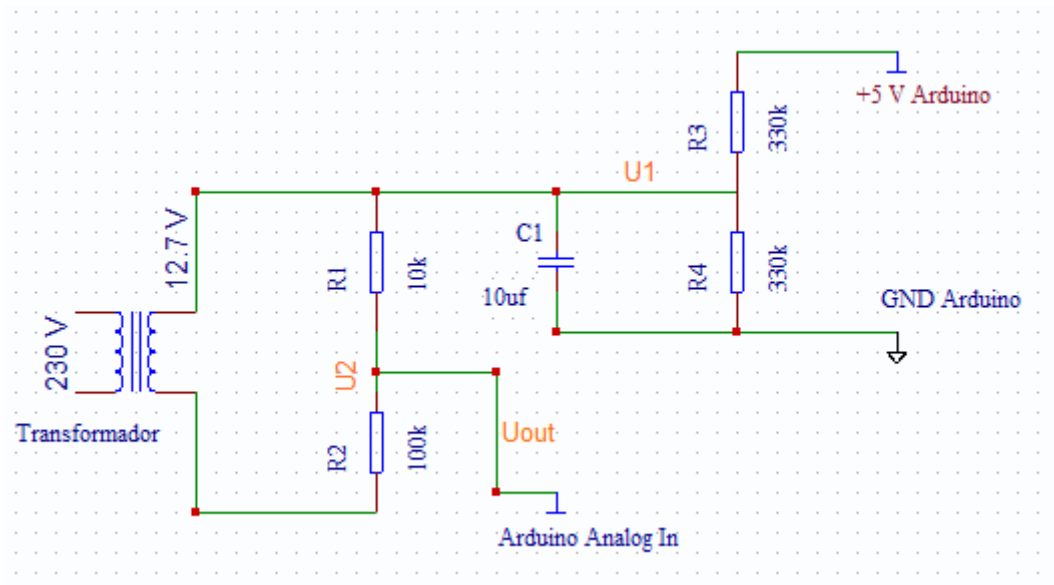


Figura 4.14 – Esquema eléctrico para obtenção do sinal de tensão

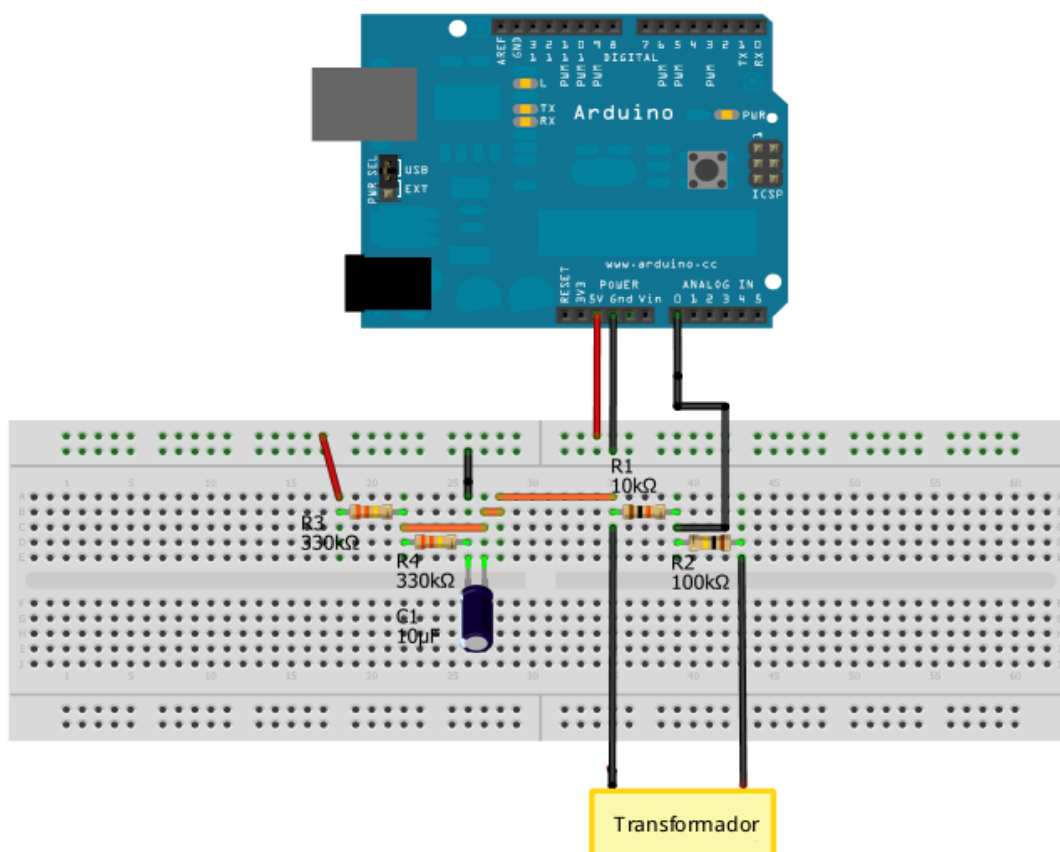


Figura 4.15 – Esquema de ligações do esquema eléctrico do sinal de tensão ao Arduino

Como referido, o divisor de tensão realizado pelas resistências  $R1$  e  $R2$  é implementado de modo a realizar o escalonamento da forma de onda, e o divisor de tensão constituído pelas resistências  $R3$  e  $R4$  foi implementado de modo a fornecer o *offset* necessário, evitando deste modo a existência de valores negativos de tensão. Como é possível verificar foi ainda adicionado um condensar,  $C1$  de  $10\ \mu\text{F}$ , cujo objectivo é o de reduzir o ruído de alta frequência.

De modo a respeitar as restrições de tensão impostas pelo Arduino, concluiu-se que a polarização (*voltage bias*, método de estabelecer tensões pré-determinadas ou correntes em vários pontos de um circuito electrónico para definir um ponto operacional apropriado), fornecida pelas resistências  $R3$  e  $R4$  deveria ser metade do valor da tensão de alimentação do Arduino, pelo que deste modo os valores das resistências  $R3$  e  $R4$  devem ser iguais. Um factor tido em conta na escolha das resistências foi o facto de quanto maior o seu valor menor ser a energia consumida, no entanto, uma resistência elevada tende a aumentar o valor de ruído existente. Tentando estabelecer um compromisso entre um baixo consumo e níveis aceitáveis de ruído, que não introduzam erros de leitura, o valor escolhido para as resistências  $R3$  e  $R4$  foi de  $330\ \text{k}\Omega$ .

Deste modo, se o Arduino se encontrar a trabalhar à sua tensão normal de funcionamento,  $5\ \text{V}$ , valor de tensão tipicamente fornecida através de um cabo USB, a onda resultante terá uma amplitude de  $2,5\ \text{V}$ , como demonstrado na Equação 4.4.

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{Arduino}} \times \left( \frac{R3}{R3 + R4} \right) \\ \Leftrightarrow U_1 &= 5 \times \left( \frac{330}{330 + 330} \right) \\ \Leftrightarrow U_1 &= 2,5\ \text{V} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Considerando então a utilização do transformador de  $9\ \text{V RMS}$ , com uma tensão de pico à saída dos seus terminais de aproximadamente  $12,7\ \text{V}$ , foi necessário dimensionar as resistências  $R1$  e  $R2$  de modo a que a soma da tensão à saída do divisor de tensão  $R1$  e  $R2$ , juntamente com a tensão à saída do divisor de tensão  $R3$  e  $R4$  fosse inferior a  $5\ \text{V}$ , satisfazendo deste modo a tensão de entrada dos pins analógicos do Arduino.

De modo a garantir uma margem de segurança, evitando o perigo de sobretensões, que pudessem afectar o bom funcionamento do Arduino, a tensão de entrada foi dimensionada para um valor abaixo dos  $5\ \text{V}$ , como demonstrado nas equações seguintes.

$$\begin{aligned} U_{\text{out}} &= \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right) \times U_{\text{pico}} + U_1 \\ \Leftrightarrow U_{\text{out}} &\leq 5\ \text{V} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Considerando que se tem uma tensão de 12,7 V à entrada das resistências  $R_1$  e  $R_2$  e que se pretende um valor aproximadamente 10 vezes inferior, os valores escolhidos para as resistências  $R_1$  e  $R_2$  foram de 10 k $\Omega$  e 100 k $\Omega$  respectivamente.

$$U_2 = \left( \frac{10}{10 + 100} \right) \times 12,7 \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$\Leftrightarrow U_2 = 1,1545 \text{ V}$$

Deste modo a tensão de pico positivo à saída do circuito e à entrada do pin analógico do Arduino será dada pela soma das tensões  $U_1$  e  $U_2$ , como demonstrado na Equação 4.7.

$$U_{out} = U_1 + U_2$$

$$\Leftrightarrow U_{out} = 2,5 + 1,15 \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$\Leftrightarrow U_{out} = 3,7 \text{ V}$$

A tensão de pico negativo, será dada pela subtração entre a tensão fornecida pelo Arduino e o pico negativo de tensão à saída do divisor resistivo  $R_1$  e  $R_2$ , como demonstrado na Equação 4.8.

$$U_{out} = U_1 - U_2$$

$$\Leftrightarrow U_{out} = 2,5 - 1,15 \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$\Leftrightarrow U_{out} = 1,35 \text{ V}$$

Como é possível verificar pelas equações anteriores, são garantidos os requisitos impostos pelos pins analógicos do Arduino e como pretendido garante-se uma margem de segurança de aproximadamente 1,3 V, prevenindo deste modo a ocorrência de sobretensões.

#### Condicionamento da corrente

Tal como no caso do condicionamento de sinal para a tensão, é necessário realizar condicionamento de sinal para a corrente de modo a que o sinal à entrada do pin analógico do Arduino, possua uma tensão positiva entre 0 V e a tensão de referência do ADC, 5 V. Deste modo e à semelhança do condicionamento de sinal para a tensão, o condicionamento de sinal para a corrente foi dividido em duas etapas:

- 1- Sensor de corrente e resistência de carga;
- 2- Divisor resistivo de tensão.



Como referido anteriormente o sinal de corrente proveniente do sensor de corrente *split core* necessita de ser convertido para um sinal de tensão de modo a poder ser lido pelo Arduino.

Tendo em conta que o sensor de corrente escolhido permite medir uma corrente até 100 A RMS, o pico positivo e o pico negativo corrente ocorrem influenciados por um factor multiplicativo de raiz de 2, sendo que a corrente existente no primário é dada pela Equação 4.9.

$$I_{prim} = \sqrt{2} \times 100 A$$

$$\Leftrightarrow I_{prim} = 141,4 A$$

(Eq. 4.9)

Como referido na Equação 4.1, a corrente do secundário é dada pela relação entre o número de voltas do enrolamento do transformador no secundário e no primário. Deste modo, e sabendo que o número de espiras no secundário é de 1350, o pico máximo de corrente no secundário é dado pela Equação 4.10.

$$I_{sec} = \frac{I_{primário}}{N_{espiras_{sec}}}$$

$$\Leftrightarrow I_{sec} = \frac{141,4}{1350}$$

$$\Leftrightarrow I_{sec} = 0,1047 A$$

(Eq. 4.10)

Com o objectivo de maximizar a resolução da medição da tensão sobre a resistência de carga no ponto onde o pico de corrente é máxima, é necessário dividir a tensão de referência do Arduino, 5 V a metade, ou seja 2,5 V. O valor ideal da resistência de carga é então dado pela Equação 4.11.

$$R_{ideal} = \frac{\frac{U_{arduino}}{2}}{I_{sec}}$$

$$\Leftrightarrow R_{ideal} = \frac{\frac{5}{2}}{0,1047}$$

$$\Leftrightarrow R_{ideal} = 23,87 \Omega$$

(Eq. 4.11)

O valor de resistência,  $R_{ideal}$ , obtido não é um valor típico pelo que é necessário escolher um valor aproximado, dentro da gama de valores disponíveis para as resistências. No trabalho em questão o valor escolhido para a resistência de carga foi de 56  $\Omega$ .

A segunda etapa do processo de condicionamento do sinal de corrente é a realização de um divisor resistivo de tensão. Este passo evita que a tensão obtida à saída da resistência de carga oscile entre valores de tensão positivos e negativos.

Tendo em conta que o Arduino exige que as tensões sejam somente positivas, se conectássemos directamente o conjunto sensor mais resistência de carga tal facto não seria verificável pelo que iriam ocorrer erros de leitura e possível destruição das portas analógicas do Arduino. A solução passou por realizar um divisor de tensão resistivo de modo a que os sinais de tensão obtidos se encontrassem num valor em torno de 2,5 V, ou seja, metade da tensão de alimentação do Arduino. Deste modo o valor escolhido para as resistências  $R1$  e  $R2$  foi de 10 k $\Omega$ . Na Equação 4.12 encontra-se o divisor de tensão efectuado.

$$U_1 = U_{Arduino} \times \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right)$$

$$\Leftrightarrow U_1 = 5 \times \left( \frac{10}{10 + 10} \right) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$U_1 = 2,5 \text{ V}$$

Com o objectivo de reduzir o ruído de alta frequência, tal como no caso do condicionamento de sinal para a tensão, foi adicionado ao circuito um condensador, C1 de 10  $\mu\text{F}$ . Na Figura 4.16 encontra-se ilustrado o circuito eléctrico correspondente e na Figura 4.17 encontra-se representado o esquema de ligação ao Arduino.

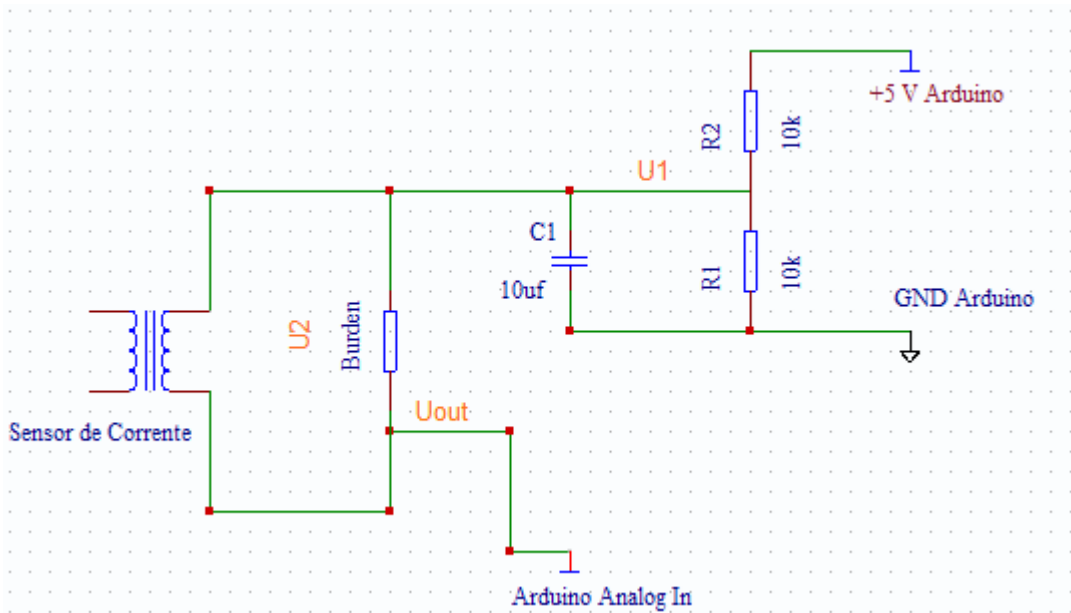


Figura 4.16 – Esquema eléctrico para obtenção do sinal de corrente

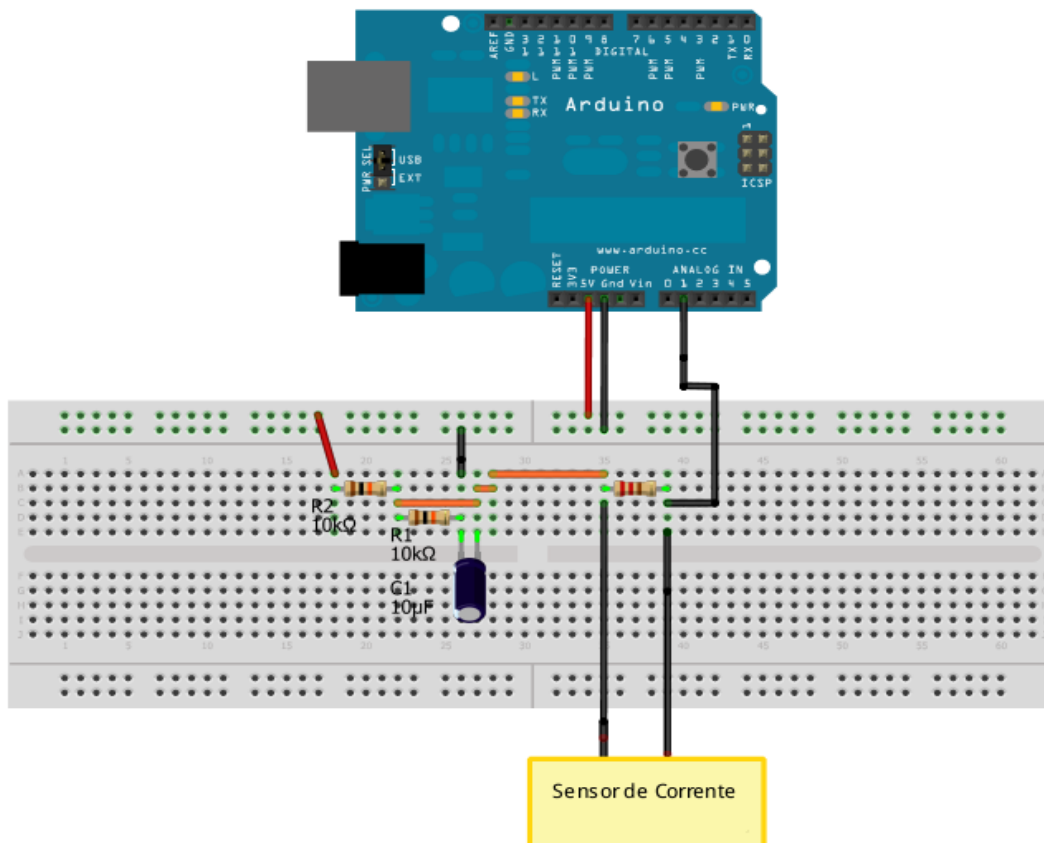


Figura 4.17 - Esquema de ligações para conversão do sinal de corrente em sinal de tensão

#### 4.3.5 Protecções

De modo a garantir a segurança e o bom funcionamento dos componentes, todos os dimensionamentos realizados e a escolha dos componentes utilizados teve em conta a tensão de funcionamento da rede, 230 V AC  $\pm$  10 %, ou seja uma tensão eficaz máxima de 253 V e uma tensão eficaz mínima de 207 V, as correntes existentes na rede e no circuito sendo realizados os dimensionamentos necessários não só para garantir uma boa leitura de dados, como também para assegurar a longevidade e qualidade do sistema.

#### 4.3.6 Comunicação

Neste subcapítulo descrevem-se os diferentes métodos de comunicação de dados utilizados no decorrer deste trabalho.

##### Comunicação USB

A transmissão de dados entre o Arduino e o computador é realizada recorrendo à porta USB (*Universal Serial Bus*). O USB é um protocolo de comunicação de periféricos e permite a

comunicação de dados a alta velocidade. Existem basicamente dois tipos de conectores USB, o tipo A e o tipo B, que podem ser vistos na Figura 4.18.

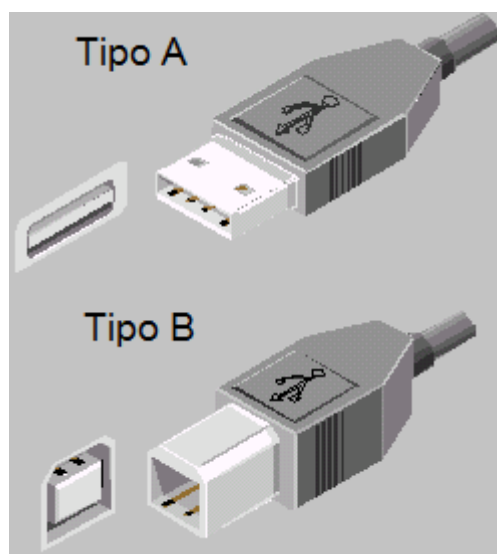


Figura 4.18 – Diferentes tipos de conexão USB

O conector tipo A encontra-se geralmente conectado ao hospedeiro (*Host*) e o conector tipo B encontra-se geralmente conectado ao periférico. No trabalho em questão foi utilizado um cabo USB tipo A-B, ficando a ponta tipo A ligada ao computador e a ponta tipo B ligada ao Arduino.

No conector tipo A, encontramos quatro pinos dos quais dois servem para alimentar o dispositivo periférico, conectado na ponta tipo B do cabo, e os outros dois para fazer a comunicação USB. Este detalhe pode ser observado na Figura 4.19.

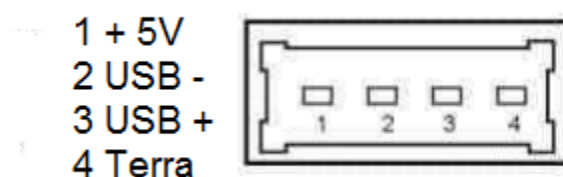


Figura 4.19 – Detalhe do conector USB tipo A

A ligação USB pode ser efectuada em série conectando directamente com um único dispositivo ou em paralelo comunicando com diversos dispositivos em simultâneo recorrendo a um dispositivo específico que partilha a largura de banda com diferentes periféricos.

A comunicação USB baseia-se numa relação de mestre-escravo, onde o mestre é USB *Host* que tem conhecimento da inserção e remoção do cabo e comanda todas as transacções de dados existentes no cabo. Os dispositivos periféricos são denominados escravos. A informação é transmitida nos dois sentidos, utilizando uma linha de transmissão de dados do mestre para o escravo (MOSI – *Master Out Slave In*) e uma do escravo para o mestre (MISO –

*Master In Slave Out*). O microcontrolador foi configurado de forma a comunicar, através do cabo USB à velocidade máxima suportada, ou seja com um *baud rate* de 115200 baud.

## Comunicação Cartão de Memória

Os cartões SD comunicam através de uma interface de um-bit síncrono, onde o *Host* fornece um sinal de relógio e dispara bits individuais para dentro e para fora do cartão SD. Após o estabelecimento da ligação, o *host* envia sinais de comando de 48-bits e recebe respostas. Uma das respostas por parte do cartão de memória pode ser que uma resposta vai possuir atraso, contudo isso não permite ao *Host* cancelar o envio de dados. No trabalho em questão o *Host* é o Arduino juntamente com a *shield* instalada de modo a suportar cartões de memória.

O cartão de memória é geralmente alimentado através de um interface de 3,3 Volts, sendo normalmente utilizada a porta SPI do *Host* para fornecer a energia necessária ao seu funcionamento. A velocidade de um cartão de memória é calculada em função do quão rápido é possível ler e escrever informação no mesmo. Em diversas aplicações onde a velocidade é um factor crucial o cartão de memória pode não funcionar satisfatoriamente. No caso específico do presente trabalho verificou-se que o cartão de memória não dispunha de velocidade suficiente para a correcta gravação dos valores instantâneos de corrente e tensão, pelo que se optou por utilizar a ligação USB série, para proceder à leitura e gravação dos mesmos no computador.

## 4.4 Firmware

A *firmware* do microcontrolador ATmega328 do Arduino foi realizada em linguagem C++, com a ajuda da plataforma de *software* Arduino IDE. O programa desenvolvido é responsável pela leitura da informação proveniente dos pins analógicos, pela sua análise, calibração e conversão. Os valores lidos são sujeitos a um processo de calibração de forma a compensar os valores de *offset* introduzidos pelo condicionamento de sinal. A conversão é resultado do processo de passagem dos sinais de corrente e tensão para valores de potência, factor potência e frequência. Os valores calculados são, a potência activa, a potência aparente, o factor de potência, a tensão eficaz, a corrente eficaz, a frequência e a transformada de Fourier.

De modo a tornar a utilização do programa mais intuitiva, foi criado um menu de opções que permite ao utilizador um maior controlo sobre os dados a obter. Na Figura 4.20 encontra-se ilustrado o referido menu.

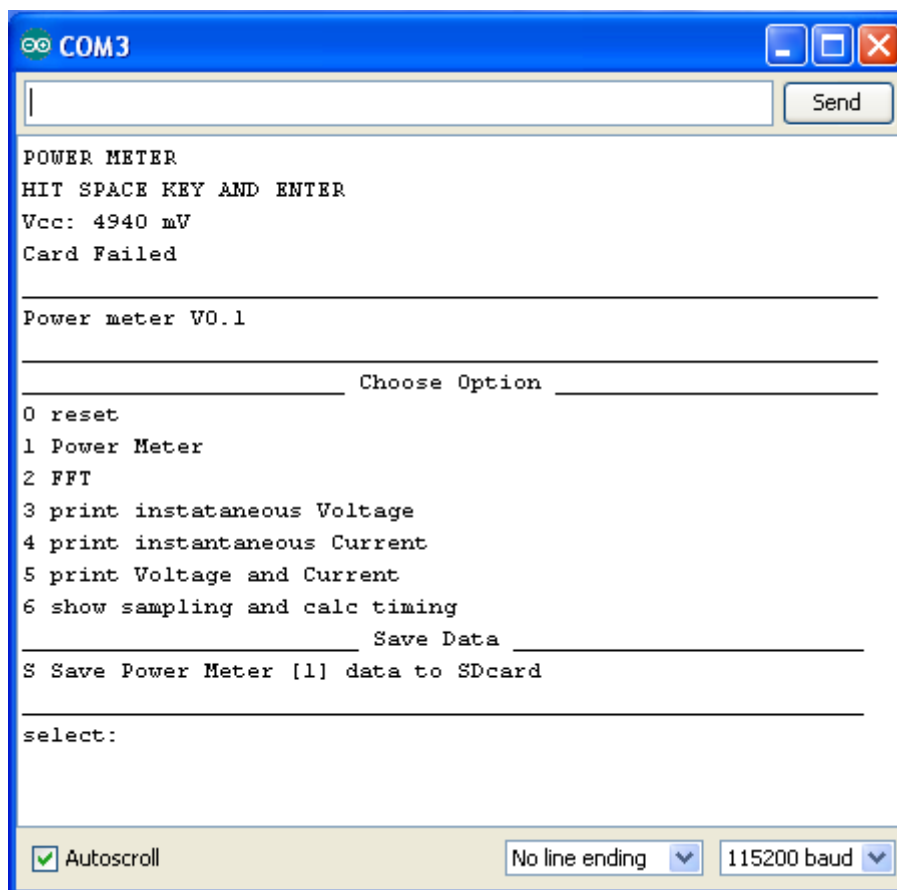


Figura 4.20 – Menu principal em ambiente Arduino

Como se pode verificar na imagem anterior o programa encontra-se a correr directamente sobre a plataforma Arduino, sendo que a gravação de dados só é possível para os dados relativos à opção #1 *Power Meter*. Este facto é devido às limitações de velocidade de escrita no cartão de memória.

Com o objectivo de contornar esta limitação e como foi referido anteriormente, optou-se por utilizar um programa capaz de ler os dados provenientes da porta USB série. Existe uma grande variedade de programas gratuitos capazes de monitorizar as portas série de um computador. Estes programas permitem não só recolher dados, como também, enviar comandos. No presente trabalho optou-se pelo programa *RealTerm* pois o mesmo dispõe da opção de gravação de dados para um ficheiro de texto, possuindo a vantagem de permitir ao utilizador seleccionar o tempo que o pretende fazer. Na Figura 4.21 é possível verificar o funcionamento do *firmware* implementado no microcontrolador do Arduino, recorrendo ao programa *RealTerm*. Como referido anteriormente a velocidade de transmissão de dados é de 115200 baud, pelo que é necessário escolher essa opção, bem como a porta série a ler.

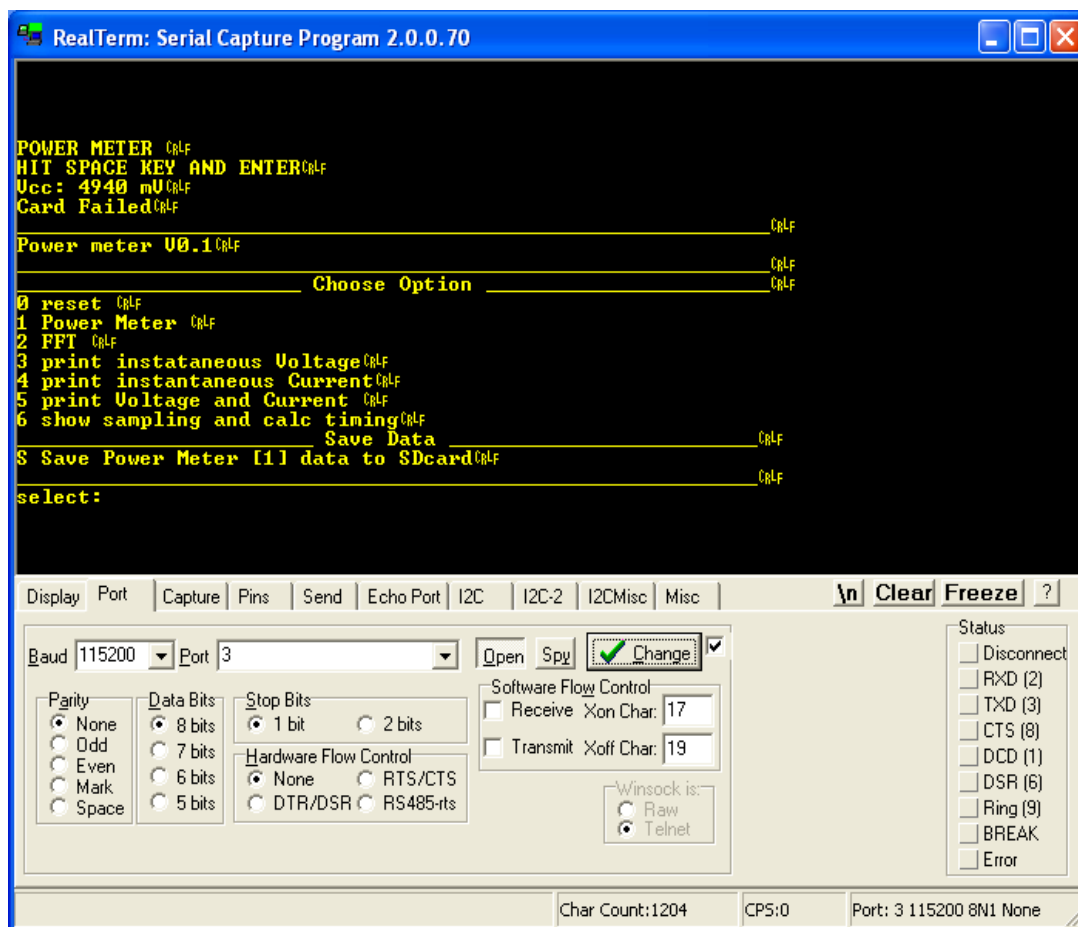


Figura 4.21 – Menu principal em ambiente RealTerm

Como se pode verificar pela figura anterior a informação apresentada ao utilizador é igual à informação apresentada caso se utilizasse a interface gráfica disponibilizada pelo Arduino. É ainda possível verificar que foi dado ao utilizador a indicação de *Card Failed*. Isto significa que o *shield* para gravação de dados se encontra sem cartão de memória, ficando a opção de gravar dados no cartão desabilitada.

## 4.5 Software

No lado do PC, foram desenvolvidos dois pequenos programas em linguagem Matlab, fazendo uso da ferramenta GUIDE que permite a realização de GUIs (*Graphical User Interfaces*). Estes programas permitem ao utilizador seleccionar qual o ficheiro de texto, contendo os dados previamente guardados, que pretende analisar. A partir destes, as aplicações disponibilizam um conjunto de gráficos, que permitem ao utilizador uma melhor análise dos dados recolhidos. Na Figura 4.22 está ilustrada a interface gráfica do programa, que permite ao utilizador visualizar os gráficos relativos aos dados guardados no cartão de memória, ou seja os dados relativos à opção #1 *Power Meter*.

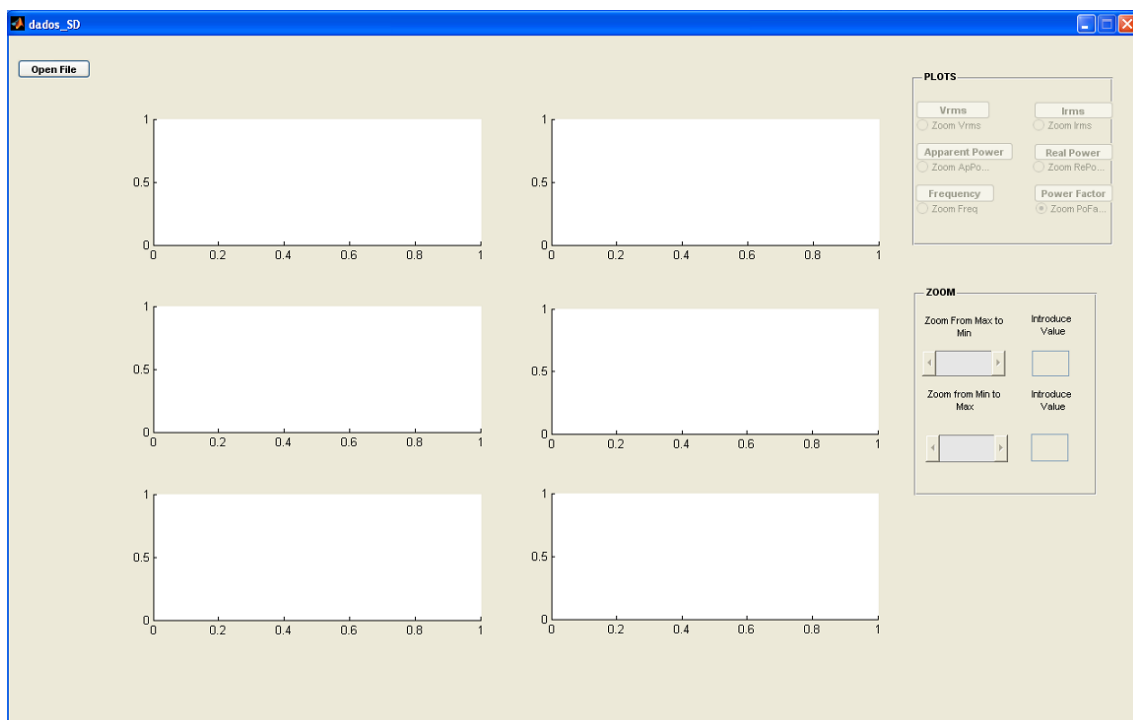


Figura 4.22 – Interface gráfica para visualização dos dados referentes à opção #1 do sistema de monitorização

Ambas as interfaces gráficas quando inicializadas apenas permitem ao utilizador a escolha de ficheiro a analisar, estando todas as outras opções desabilitadas. Todas as outras funções e botões só são activados após o correcto carregamento do ficheiro.

A interface gráfica para leitura dos dados do cartão de memória dispõe de seis gráficos diferentes, sendo que cada um representa um dos parâmetros a avaliar. A selecção do gráfico é realizada pelo utilizador através dos respectivos botões que se encontram à direita dos gráficos. Como referido anteriormente o estudo da qualidade de energia é geralmente realizado ao longo de um período mínimo de sete dias o que gera uma grande quantidade de dados. Com o objectivo de permitir ao utilizador uma melhor percepção dos mesmos foi ainda introduzido um botão de *zoom* o qual permite analisar uma zona específica do gráfico. É importante referir que o *zoom* é realizado individualmente para cada gráfico.

Os dados são guardados no cartão de memória segundo o formato ilustrado na Figura 4.23.

XXXX.XX	,	XXXX.XX	,	X.XX	,	XXX.XX	,	XXX.XX	,	XX.XX
Pactiva		Paparente		FP		Tensão		Corrente		Frequência

Figura 4.23 – Formato de gravação de dados para a opção #1 do sistema de monitorização

Na Figura 4.24 está ilustrada a interface gráfica que permite a análise dos dados instantâneos da corrente e da tensão, guardados em ficheiro de texto recorrendo ao programa RealTerm.



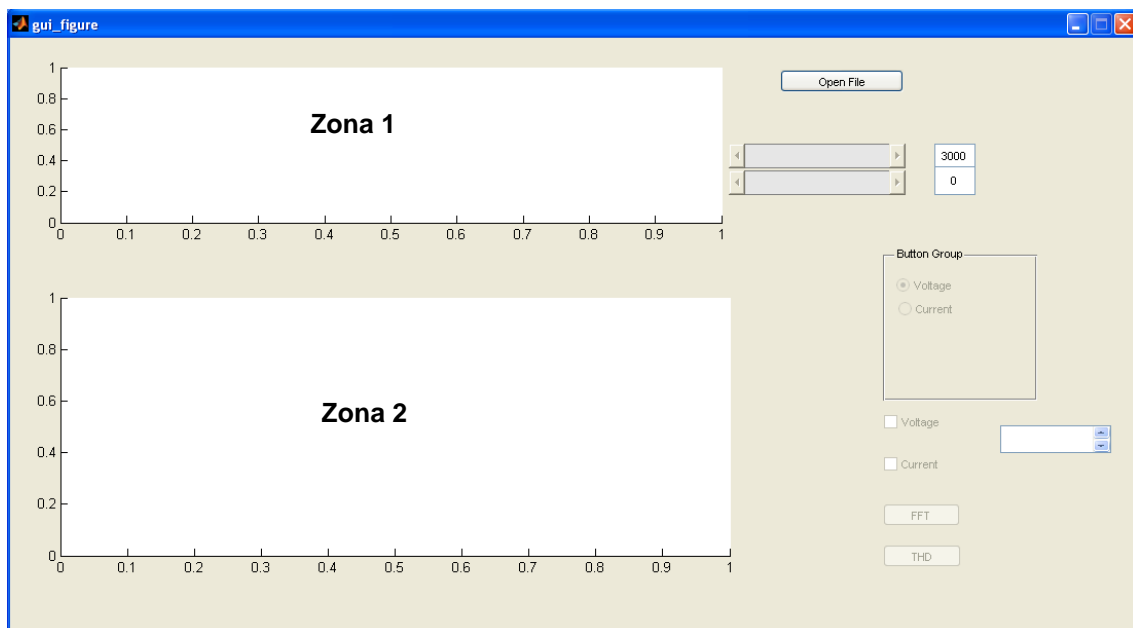


Figura 4.24 – Interface gráfica para a visualização dos dados instantâneos de corrente e de tensão

Esta interface gráfica possui duas zonas de gráficos sendo que a primeira permite analisar as ondas de tensão e corrente instantânea, e a segunda zona permite verificar parâmetros da qualidade das ondas obtidas como a transformada de Fourier e a distorção harmónica total. Considera-se que cada amostra de corrente e tensão é constituída por dados com uma duração de 3000 ms, ou 3 segundos. O utilizador pode escolher entre os sinais de tensão ou corrente, a apresentar na zona um, através dos botões implementados à direita da zona de gráficos. Existe ainda uma zona de selecção em forma de lista (*listbox*) que permite ao utilizador seleccionar qual o conjunto de dados de 3 segundos que pretende analisar. O número de amostras na *listbox* é dependente do tamanho do ficheiro de texto. Para uma melhor análise das formas de onda de tensão e corrente foi adicionada a opção de *zoom*.

Na zona dois são apresentados os gráficos relativos a distorção harmónica total e à transformada de Fourier. A escolha entre qual dos gráficos a apresentar é realizada através de botões implementados para o efeito. Os gráficos na zona dois são dependentes das opções realizadas na zona um, isto é, caso seja seleccionado o gráfico de corrente na zona um, na zona dois serão apresentadas a distorção harmónica ou a transformada de Fourier para esse mesmo conjunto de dados. Os valores instantâneos de tensão e corrente são gravados num ficheiro de texto segundo o formato ilustrado na Figura 4.25.

,
XXX
,
XXX  
 $V_{inst}$                        $I_{inst}$

Figura 4.25 – Formato de gravação dos dados da corrente e tensão instantâneos

## 4.6 Módulos de Leitura

Como já foi referido anteriormente o sistema implementado permite a monitorização dos consumos e influências na qualidade de energia ao nível do equipamento eléctrico. No entanto, com o sensor de corrente escolhido, *split core*, não é possível obter correctamente os valores de corrente envolvendo o cabo de alimentação do equipamento. Assim, foi construído um módulo, que se coloca entre a tomada eléctrica e o equipamento a monitorizar. Este módulo é constituído por uma tomada tripla para que se possa conectar em simultâneo o equipamento eléctrico a monitorizar bem como, o transformador utilizado para a obtenção do sinal de tensão.

Este módulo, além de alimentar o dispositivo electrónico, alimentar o transformador utilizado para medição de tensão, disponibiliza ainda um fio condutor (fase) para colocar o sensor de corrente e deste modo obter correctamente os valores de corrente consumida pelo equipamento a monitorizar. Este módulo pode ser utilizado para monitorizar equipamentos eléctricos com consumo máximo de 16 A. No apêndice I, encontra-se a lista de todo o material utilizado na construção do sistema de monitorização. O custo de produção do sistema foi de aproximadamente 75 €.

## 4.7 Especificações

As especificações do sistema de monitorização de energia eléctrica são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Especificações do sistema de monitorização implementado

Parâmetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Condições de Funcionamento Recomendadas					
Gama de Tensão	$V_{rms}$	207	230	253	V
Gama de Corrente	$I_{rms}$	0	-	100	A
Frequência	$Freq$	-	50	-	Hz
Resolução das Medições					
$V_{rms}$	$V_{resolução}$	-	0,01	-	V
$I_{rms}$	$I_{resolução}$	-	0,01	-	A
$P_{activa}$	$P_{activa_{resolução}}$	-	0,01	-	W
$P_{aparente}$	$P_{aparente_{resolução}}$	-	0,01	-	VA
Frequência	$Freq_{resolução}$	-	0,01	-	Hz
FP	$FP_{resolução}$	-	0,01	-	-



## 5 - Simulação e Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os testes realizados com o sistema de monitorização, com o objectivo de verificar o seu funcionamento e avaliar alguns dos dados obtidos.

### 5.1 Calibração

O processo de calibração do sistema de aquisição de dados foi realizado para garantir a validade dos dados medidos. Este processo baseou-se na eliminação da componente de *offset* nos canais de entrada no microcontrolador, na compensação do factor de fase e no ajuste dos factores de conversão.

#### 5.1.1 Eliminação de offset

A calibração dos canais de entrada foi realizada por *software*, no qual são compensados os valores de *offset* DC dos canais de tensão e corrente. A calibração dos mesmos teve em conta a tensão de alimentação do transformador, 230 V AC, a tensão fornecida pelo transformador, 9 V AC, a resistência de carga e o número de espiras existentes no sensor de corrente. A comparação e o ajuste dos valores obtidos foram realizados recorrendo a um sistema de monitorização *plug in*, da marca Hama, que apresenta erros de medição dentro dos valores normais para este tipo de aparelhos. A compensação foi realizada ao nível do *software*, alterando o valor das constantes implementadas para o efeito. Posteriormente procedeu-se a uma nova comparação dos valores obtidos com diversos sistemas de monitorização, sendo os resultados apresentados nos próximos subcapítulos.

#### 5.1.2 Compensação do factor de fase

A compensação da deslocação de fase introduzida pela leitura dos sinais do sensor de corrente e do transformador de tensão foi realizada por *software*.

O algoritmo implementado em *software* aplica uma proporção, uma constante, da diferença entre o valor actual de amostragem e o valor da amostra anterior. O resultado é a geração de uma nova onda que se apresenta deslocada no tempo comparativamente com a onda original. Foi necessária a implementação desta compensação pois o Arduino não tem a capacidade de ler os dois sinais em simultâneo o que resultaria num erro de leitura relativamente aos valores de potência pois os sinais de corrente e tensão seriam obtidos em instantes de tempo diferentes, com um atraso temporal.

### 5.1.3 Factores de conversão

Os factores de conversão foram utilizados de modo a converter os sinais analógicos medidos para os seus valores reais. Estes factores dependem sobretudo dos rácios implementados, das correcções efectuadas e do número de amostras recolhidas. Na conversão dos sinais analógicos para o seu valor real foram ainda tidos em conta os condicionamentos de sinal realizados. Um aspecto importante a ter em conta é que devido às limitações de processamento do Arduino e ao elevado número de dados por segundo, não se verificou viável a conversão dos sinais instantâneos de corrente e tensão para os seus valores reais pois tal facto resultaria na perda de informação e em diversos erros de conversão. Como tal esses valores são apresentados graficamente numa escala que pode ter valores desde 0 a 1023, perfazendo um total de 1024 níveis diferentes de tensão. O número de intervalos de níveis de tensão é realizado pelo conversor digital analógico (CDA) do Arduino, onde 0 V é representado pelo valor 0 e 5 V é representado pelo valor 1023. Deste modo uma tensão de 2,5 V é representada pelo valor 511. Devido ao facto dos valores instantâneos de corrente e tensão se destinarem sobretudo a uma análise da forma de onda, este factor não põe em causa a boa aquisição das mesmas.

## 5.2 Erros de Medição

A aferição da calibração do dispositivo foi efectuada através da realização de diversos ensaios, nomeadamente a determinação dos erros de medida do valor eficaz da tensão ( $V_{rms}$ ), do valor eficaz da corrente ( $I_{rms}$ ), da potência activa ( $P_{activa}$ ), da potência aparente ( $P_{aparente}$ ), da frequência ( $Freq$ ), do factor de potência ( $FP$ ) e da distorção harmónica total ( $DHT$ ). Todos os valores medidos pelo dispositivo de monitorização foram comparados com os medidos pelo aparelho de monitorização C.A 8332b da Chauvin-Arnoux descrito anteriormente. Este aparelho apresenta uma resolução de 0,1 V e de 0,1 A e um erro de medida inferior a 1 % para medição de tensões e correntes alternadas.

### 5.2.1 Valor eficaz da tensão

O sinal de tensão é obtido através da leitura da rede eléctrica, pelo que apresenta um valor de 230 V, podendo ter uma variação de  $\pm 10$  %. Como tal, de modo a determinar o erro de medição do valor eficaz da tensão foi suficiente ligar o dispositivo de monitorização à rede eléctrica e proceder à leitura da mesma. A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos da avaliação do erro de medição do valor eficaz da tensão.

Tabela 5.1 – Erro de medição para o valor eficaz da tensão

$V_{rms} (V)$		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
242,3	243,2	0,37
242,5	243,48	0,40
242,1	242,84	0,31
242,9	243,4	0,21
242,7	243,08	0,16

Como é possível verificar pelos dados apresentados na Tabela 5.1, o dispositivo de monitorização projectado apresenta um erro de medição de  $V_{rms}$  inferior a 0,5 %, o que se apresenta como um valor aceitável. No entanto é necessário ter em conta que o monitor C.A 8332b já possui um erro de medida de aproximadamente 1 %.

### 5.2.2 Valor eficaz da corrente

O sinal de corrente utilizado foi obtido através da leitura de uma das fases do quadro eléctrico existente na sala 1.5 do Edifício X, Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa. Atendendo que o sensor de corrente instalado é capaz de efectuar leituras até uma corrente alternada de 100 A foi necessária a realização de diversos ensaios para diversos valores de corrente. De modo a obter a corrente mais baixa possível desligou-se a grande maioria dos equipamentos eléctricos presentes na sala, sendo que para se obter os valores de corrente mais elevados se recorreu a um motor existente na sala. No entanto, não foi possível realizar uma avaliação do erro de medida para toda a gama de leitura do sensor pois as cargas existentes não eram suficientes. A Tabela 5.2 apresenta os resultados da avaliação do erro de medição do valor eficaz da corrente.

Tabela 5.2 – Erro de medição para o valor eficaz da corrente

$I_{rms}(A)$		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
0,4	0,39	2,50
1,2	1,24	3,33
2,1	2,11	0,48
4,5	4,53	0,67
7,3	7,29	0,14
11,4	11,43	0,26

Como é possível verificar e tal como previsto, para valores de correntes muito baixos, o dispositivo de monitorização apresenta um erro de medição elevado. O C.A 8332b tem uma resolução de 0,1 A o que para valores de corrente pequena, que exigem uma maior resolução não é ideal. Contudo, é possível verificar que para correntes superiores a 1 A, o erro de medição torna-se inferior a 1 %, conforme demonstrado na Tabela 5.2. Não tendo sido possível a obtenção de dados para uma corrente superior a 11,5 A, mas tendo em conta os resultados obtidos, é expectável que um aumento de corrente se traduza numa manutenção do erro de medição em valores abaixo de 1 %. Os resultados obtidos encontram-se dentro dos valores previstos.

### 5.2.3 Potência activa

O erro de medição da  $P_{activa}$  foi determinado através da realização de ensaios com diferentes cargas, dependendo dos aparelhos que se encontravam em funcionamento e a serem alimentados pelo quadro da sala 1.5, referida anteriormente. Os valores de  $P_{activa}$  foram comparados com os valores do dispositivo C.A 8332b. A Tabela 5.3 mostra os resultados obtidos da avaliação do erro de medição da potência activa.

Tabela 5.3 – Erro de medição para os valores de potência activa

Protótipo			C.A 8332b	Erro de Medição (%)
$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	$P_{activa}$ (W)		
243,2	2,76	614,57	631	2,60
243,26	2,5	550,09	575,4	4,40
242,95	2,44	539,77	563,7	4,25
243,17	2,47	546,61	568,8	3,90
243,15	4,4	1022,54	1048,9	2,51
242,18	6,08	1425,46	1409,7	1,12

Como é possível verificar pelos dados apresentados na Tabela 5.3 o erro de medição é superior para potências mais baixas. Tal facto é justificável pela existência de correntes baixas que, como verificado anteriormente, apresentam um maior erro de medição. O erro de medida existente pode também estar relacionado com outros factores tais como a conversão dos valores ou a compensação do deslocamento de fase.

### 5.2.4 Potência aparente

A potência aparente é obtida pela multiplicação da tensão com o conjugado da corrente, sendo esta normalmente a potência utilizada para dimensionamento de cablagens e sistemas de protecção das instalações eléctricas. A unidade de medida da potência aparente é



o Volt-Ampere. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos por comparação com o sistema de monitorização da Chauvin-Arnoux.

Tabela 5.4 – Erro de medição para os valores de potência aparente

$P_{aparente}(VA)$		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
522,8	526,32	0,67
527,8	528,76	0,18
536,5	536,8	0,06
533,7	533,73	0,01
537,7	537,48	0,04
540,2	539,39	0,15
560,7	562,27	0,28

Através da Tabela 5.4 é possível verificar que o erro de medição existente é inferior a 1 %. Pode-se afirmar que o erro de medição da potência activa depende directamente dos erros de medição do valor eficaz da corrente e do erro de medição do valor eficaz da tensão, pelo que tende a ser maior para correntes mais pequenas.

### 5.2.5 Frequência

De modo a calcular a frequência, foi necessário calcular o período de tempo que um sinal de tensão demora a passar por dois zeros consecutivos, ou seja o tempo decorrido para uma oscilação. Calculado esse tempo foi possível calcular a frequência pois esta é dada pelo inverso do período. O cálculo do tempo e da frequência foram implementados à semelhança dos factores anteriores em *software*. Na Tabela 5.5 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 5.5 – Erro de medição para os valores de frequência

$Frequência (Hz)$		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
50,01	50,05	0,08
50	50,01	0,02
49,99	49,99	0,00
49,99	50	0,02

Como é possível verificar o erro de medição para a frequência é praticamente inexistente, sendo que o valor de frequência obtido se encontra próximo do valor nominal expectável de 50 Hz.

### 5.2.6 Factor de potência

O factor de potência (*FP*), representa a relação entre a potência activa e a potência aparente. Os valores do factor de potência variam entre zero, para elementos indutivos e capacitivos ideais, e um para cargas puramente resistivas. O factor de potência é também observável através da desfasagem entre a tensão e a corrente. No caso em que o FP é igual a um significa que a carga é puramente resistiva e que a corrente se encontra em fase com a tensão. No caso em que o FP é inferior a um, podem ocorrer duas situações diferentes dependendo do tipo de carga. Se a carga possuir uma característica indutiva então a onda de corrente encontrar-se-á em atraso em relação à onda de tensão, se a carga possuir uma característica capacitiva então a onda de corrente encontrar-se-á em avanço em relação à onda de tensão. A Tabela 5.6 apresenta os resultados da avaliação do erro de medição do factor de potência.

Tabela 5.6 – Erro de medição para os valores do factor de potência

Factor de Potência		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
0,927	0,91	1,83
0,926	0,91	1,73
0,925	0,9	2,70
0,927	0,91	1,83
0,937	0,91	2,88

Sendo o factor de potência dado pela relação entre a potência activa e a potência aparente o erro de medição do mesmo depende directamente do erro de medição de ambas as potências. Como se pode constatar pelos dados apresentados na Tabela 5.6, o dispositivo de monitorização apresenta um erro de medição inferior a 3 % o que se pode considerar aceitável.

É importante lembrar que o objectivo deste trabalho era a realização de um sistema de monitorização a um preço acessível que permitisse ao utilizador ter uma noção dos seus consumos e da rede eléctrica em geral. Como tal, e atendendo ao facto das comparações dos valores obtidos terem sido realizadas através de um aparelho de medição profissional cujo preço é de aproximadamente 1800 €, consideram-se como aceitáveis todos os parâmetros obtidos pelo sistema de monitorização desenvolvido.

### 5.2.7 Distorção harmónica total

A distorção harmónica total (*DHT*) corresponde à alteração da forma de onda causada por harmónicas de período não fundamental. A distorção harmónica pode ser verificada quer nas ondas de tensão como nas ondas de corrente. De acordo com a norma EN 50160 uma DHT de tensão inferior a 5 % é considerada normal não havendo o perigo de avarias de equipamentos, um valor entre 5 e 8 % revela uma poluição harmónica significativa, podendo

levar à destruição de alguns equipamentos electrónicos mais sensíveis. Uma distorção harmónica superior a 8 % representa uma distorção bastante considerável pelo que são previstas diversas falhas nos diferentes equipamentos electrónicos, sendo recomendada a colocação de dispositivos de atenuação. De acordo com a norma a frequência de cada harmónica a dividir pela frequência fundamental deve resultar numa distorção harmónica inferior ou igual a 5 %.

Relativamente à distorção harmónica da onda de corrente, um valor de DHT inferior a 10 % é considerado como normal, não havendo perigos de mau funcionamento dos equipamentos eléctricos, um valor de distorção compreendido entre 10 e 50 % revela uma poluição harmónica significativa e tal como no caso da onda de tensão pode levar à destruição de alguns equipamentos mais sensíveis. Um valor superior a 50 % revela uma distorção harmónica bastante elevada pelo que é provável a avaria de diversos equipamentos. Tal como no caso da tensão é recomendado o uso de aparelhos de atenuação.

No presente trabalho a distorção harmónica, ao contrário dos outros parâmetros, não foi calculada directamente a partir da implementação de *software* em Arduino.

Sendo a distorção harmónica calculada a partir da forma de onda, criada a partir dos valores instantâneos dos sinais de corrente e tensão, verificou-se que o Arduino não possuía nem capacidade de processamento nem de memória para recolher os sinais e calcular a distorção em simultâneo pelo que se optou por gravar os dados num ficheiro de texto e analisar os mesmos recorrendo à interface gráfica criada em Matlab. As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam respectivamente os resultados da avaliação do erro de medição da distorção harmónica de tensão e corrente. Os valores das distorções harmónicas são dados em percentagem.

Tabela 5.7 – Erro de medição para os valores da distorção harmónica total da tensão

$DHT_V$ (%)		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
2,7	4,85	79,63
2,7	4,93	82,59
2,8	5,04	80,00
2,7	4,96	83,70
2,6	4,15	59,62

Tabela 5.8 – Erro de medição para os valores da distorção harmónica total da corrente

$DHT_I$ (%)		Erro de Medição (%)
C.A 8332b	Protótipo	
30,1	24,44	18,80
33,1	30,02	9,31
32,2	28,77	10,65
30,8	25,82	16,17
31,7	26,11	17,63

Como é possível verificar pela Tabela 5.7, os erros de medição para a distorção harmónica de tensão são bastante elevados, na ordem dos 80 %. Isto é explicável pelo facto de os valores de distorção em si já serem apresentados como percentagens, pelo que a mais pequena variação entre os valores a comparar reflecte-se num erro de medição acentuado. No entanto verifica-se que os valores de distorção obtidos vão ao encontro dos limites estabelecidos pela norma.

Relativamente aos erros de medição obtidos para a distorção harmónica de corrente e representados na Tabela 5.8, verifica-se que os mesmos apresentam valores de erro inferiores aos obtidos para a tensão. Como se pode verificar a distorção harmónica da corrente é superior a 30 % o que se encontra dentro dos parâmetros expectáveis segundo a norma.

A existência de erros de medição elevados, quer na DHT da tensão como na da corrente, não são problemáticos pois estes erros são obtidos através da comparação de valores percentuais, onde uma diferença pouco significativa de 1 % pode resultar num erro de mais de 50 %.

## 5.3 Ensaios de Funcionamento

Os ensaios de funcionamento foram realizados de modo a verificar e validar o comportamento do sistema de monitorização em situações reais. Foram realizados diversos ensaios ao nível dos equipamentos eléctricos para avaliar os seus consumos e as suas influências na qualidade de energia da rede eléctrica. Foram ainda realizados ensaios ao nível do quadro eléctrico. Importante lembrar que de modo a realizar os ensaios ao nível do equipamento eléctrico foi necessária a utilização do módulo referido no capítulo 4.6.

### 5.3.1 Ensaio de funcionamento ao nível do quadro eléctrico

Os ensaios ao nível do quadro eléctrico foram realizados durante um período de sete dias, sendo este o tempo estipulado pela norma EN 50160 de modo a avaliar a qualidade da rede eléctrica. O conjunto de dados obtidos encontra-se representado na Figura 5.1.

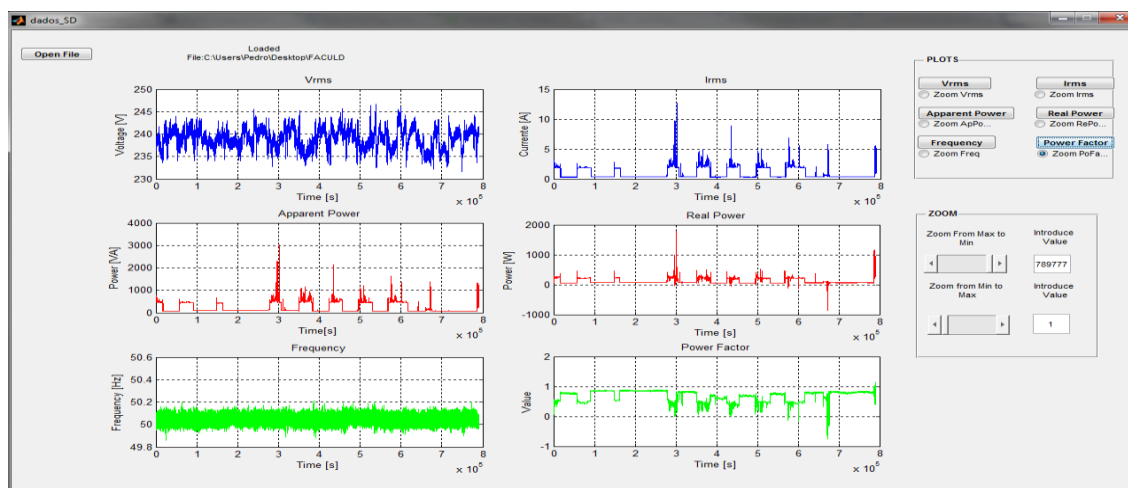


Figura 5.1 – Dados obtidos após uma semana de monitorização do quadro eléctrico

Como é possível verificar e como expectável os valores de tensão encontram-se dentro da gama de  $230\text{ V} \pm 10\%$  ( $207 - 253\text{ V}$ ) e a frequência encontra-se em  $50\text{ Hz} \pm 1\%$  ( $49.5 - 50.5\text{ Hz}$ ). No entanto, o factor de potência apresenta valores negativos, sendo que os valores em regime normal se apresentam dentro do intervalo  $[0 ; 1]$ . O motivo da obtenção de tais valores deve-se ao facto da existência de um motor/gerador na sala onde o quadro se encontra instalado. Nas situações onde o factor de potência é negativo, verifica-se também que a potência activa é negativa, ou seja, o motor encontra-se a trabalhar como um gerador, pelo que introduz potência na rede. As situações de factor de potência mais baixo, coincidem também com as situações de corrente e potência mais elevada, sendo novamente justificado pelo funcionamento do motor/gerador descrito anteriormente. Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 é possível verificar em pormenor a situação descrita.

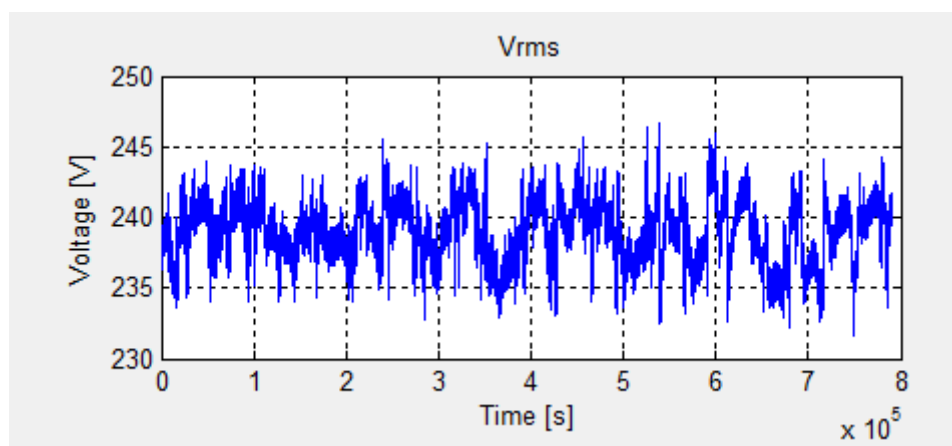


Figura 5.2 – Tensão eficaz ao longo de uma semana

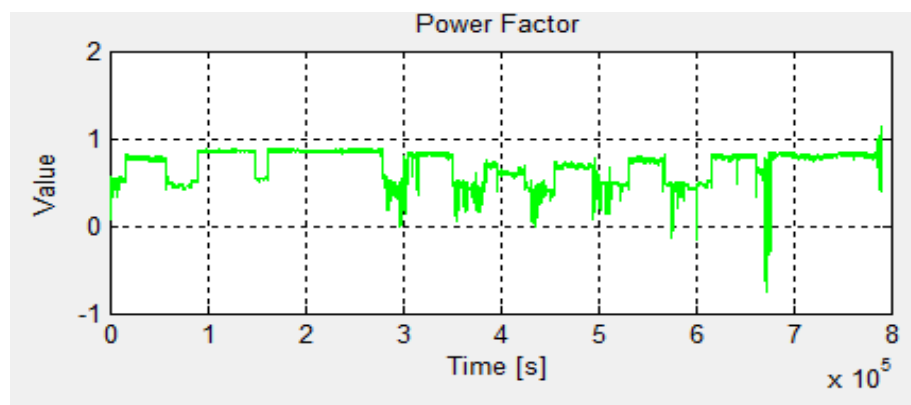


Figura 5.3 – Factor de potência ao longo de uma semana

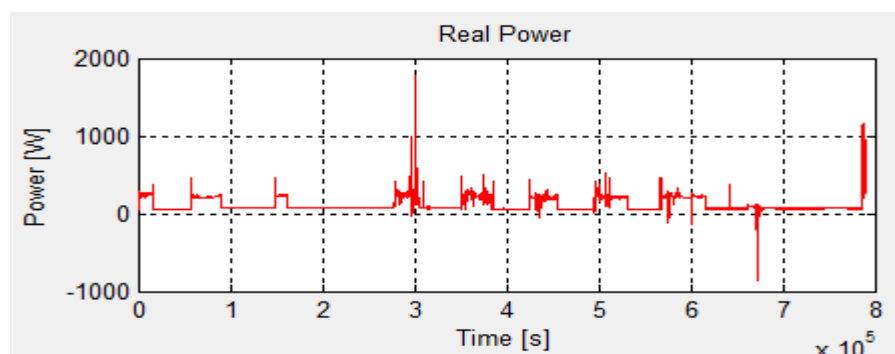


Figura 5.4 - Potência activa ao longo de uma semana

Como referido anteriormente o programa implementado para visualização de gráficos permite a realização *zoom* pelo que é possível analisar em pormenor a situação onde o factor de potência se apresenta mais negativo, ou seja o gerador se encontra a introduzir o maior valor de energia na rede. Tal facto é verificável na Figura 5.5.

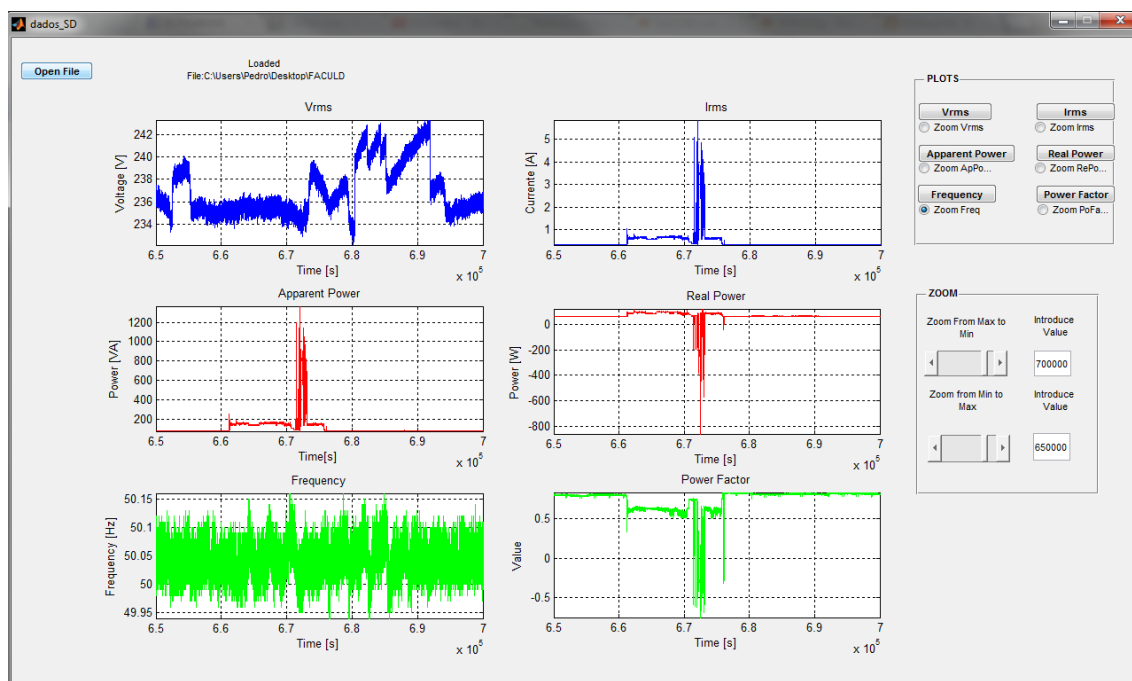


Figura 5.5 – Realização de *zoom* para melhor visualização de um determinado intervalo de tempo

Com o objectivo de analisar a forma de onda de corrente e tensão no quadro em questão procedeu-se à gravação dos valores instantâneos de corrente e tensão por um período de 30 segundos. Durante esse período foram obtidos vários conjuntos de amostras seguidas, cada conjunto corresponde a 3 segundos dos sinais. Foram obtidos 9 conjuntos, tendo sido automaticamente rejeitado um décimo conjunto, pois não continha o número de pontos suficientes. Isto deve-se ao facto de o momento de início da gravação dos dados não coincidir com o momento inicial da amostragem de um conjunto de dados. No entanto, garante-se que para um período de 30 segundos o número mínimo de conjuntos de amostras obtidas é de 9. A frequência de amostragem do Arduino é de aproximadamente 1034 Hz. Na Figura 5.6 é possível observar a forma de onda da tensão, sendo que na Figura 5.7 se apresenta a mesma forma de onda após a realização de *zoom* para um determinado intervalo específico de tempo.

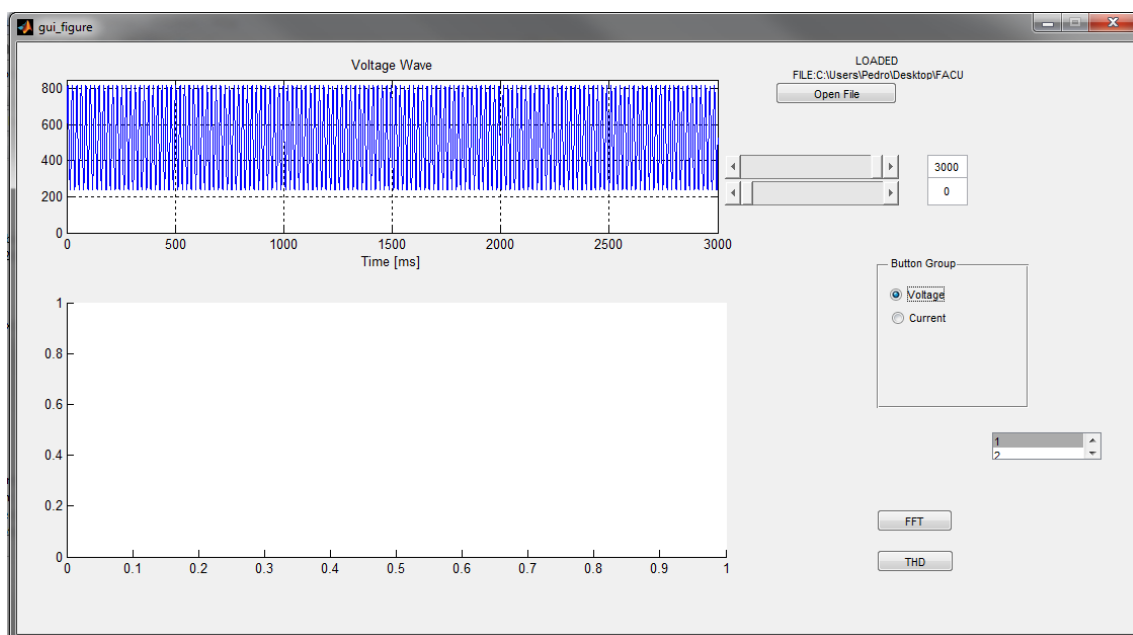


Figura 5.6 – Sinal de tensão obtido por um período de 3 segundos

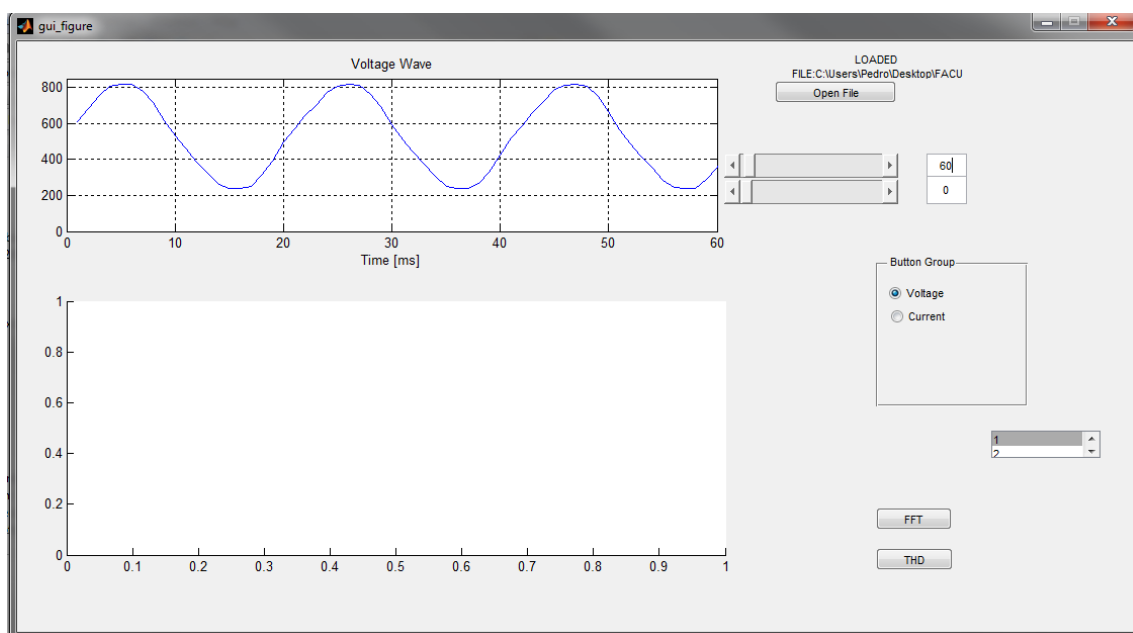


Figura 5.7 – Pormenor da forma de onda de tensão para um período de 60 ms

O programa implementado permite ainda a obtenção da transformada de Fourier para cada uma das amostras obtidas. Na Figura 5.8 é possível observar a transformada de Fourier da primeira amostra.

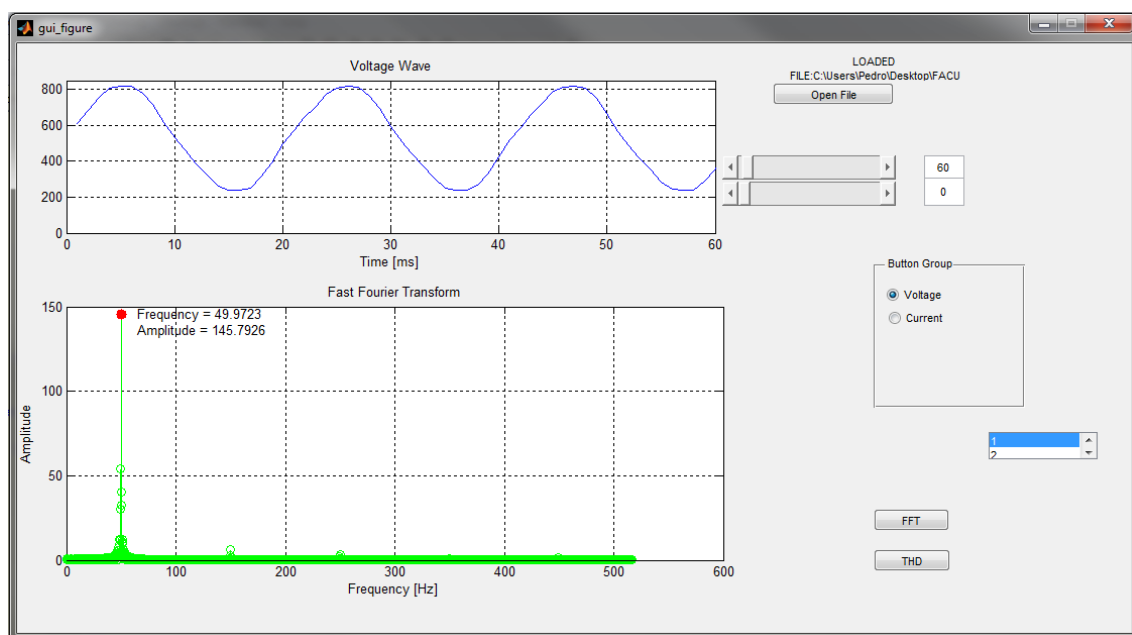


Figura 5. 8 – Forma de onda da tensão e respectiva transformada de Fourier

Como é possível verificar pela Figura 5.8 a onda de tensão obtida tem uma frequência de aproximadamente 50 Hz, sendo ainda verificável a presença de uma terceira harmónica em 150 Hz e de uma quinta harmónica em 250 Hz. Na Figura 5.9 é apresentada a distorção harmónica para cada uma das 9 amostras obtidas, bem como a média do conjunto de amostras.



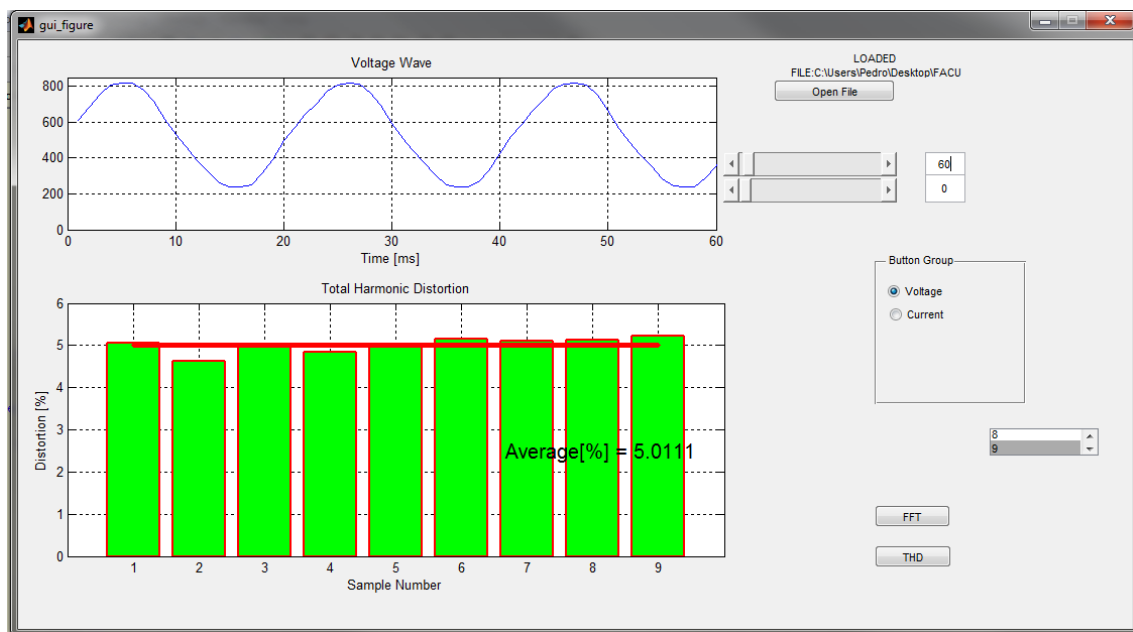


Figura 5.9 – Forma de onda da tensão e respectiva distorção harmónica

Conclui-se que a média da distorção harmónica para os sinais de tensão obtidos é de 5 % o que vai ao encontro dos valores normais. Estudo semelhante foi realizado para o sinal de corrente. Os resultados encontram-se demonstrados nas Figuras 5.10 e 5.11.

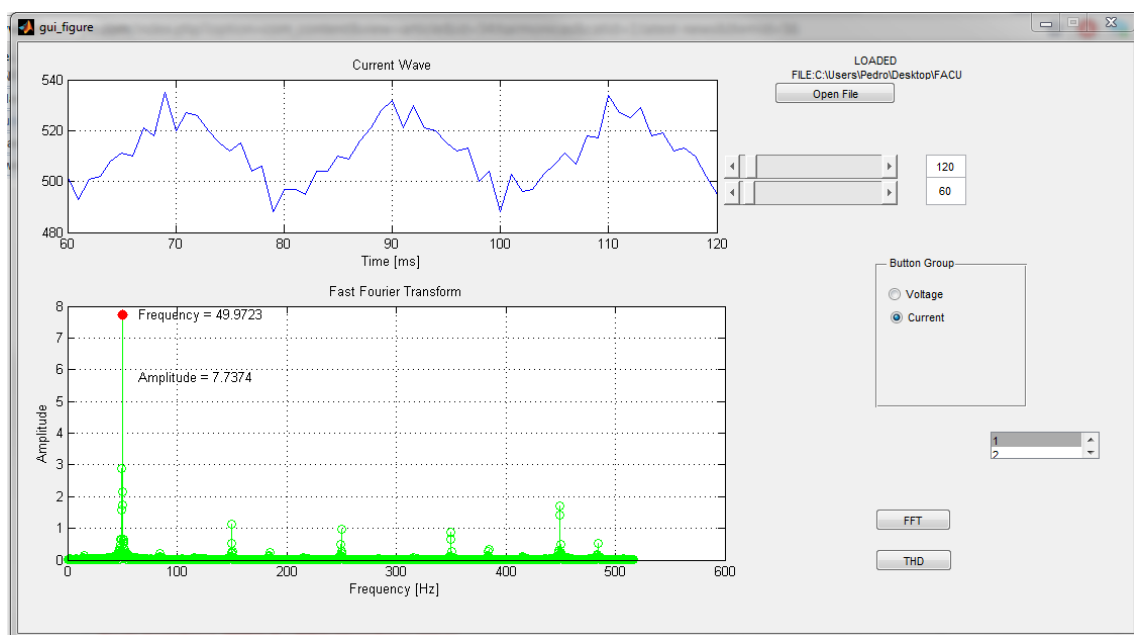


Figura 5.10 – Forma de onda da corrente e respectiva transformada de Fourier

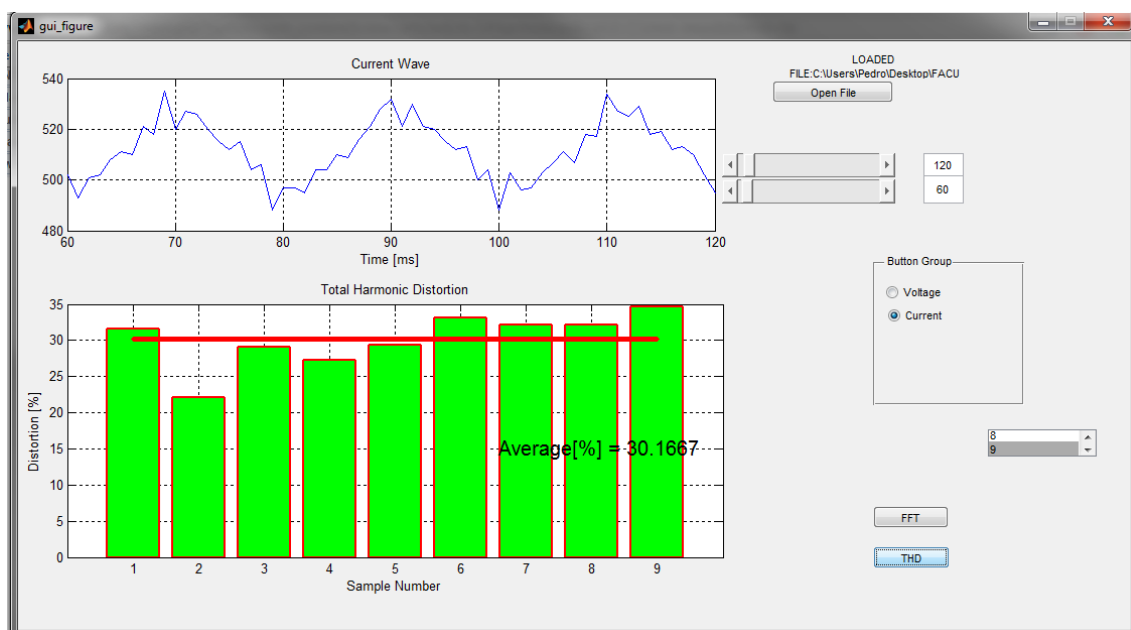


Figura 5.11 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica

Como é possível verificar pelas figuras anteriores a forma de onda da corrente encontra-se com uma distorção elevada, encontrando-se muito longe da sua forma ideal, a sinusóide. A frequência da onda é de aproximadamente 50 Hz e a sua distorção harmónica total apresenta uma média de distorção de 30 %. De acordo com o subcapítulo 5.2.7, uma distorção harmónica de corrente entre 10 e 50 % revela uma poluição harmónica significativa pelo que pode ser prejudicial para os equipamentos mais sensíveis.

### 5.3.2 Ensaios de funcionamento ao nível dos equipamentos eléctricos

Os ensaios realizados ao nível dos equipamentos eléctricos foram efectuados de modo a analisar os consumos e as influências dos mesmos na qualidade de energia da rede. Para proceder a estes ensaios foram usados equipamentos comuns, existentes na grande maioria das casas, tais como, um computador, um aquecedor, um microondas, uma lâmpada incandescente e uma lâmpada economizadora.

#### Computador

Os ensaios de consumo e influências do computador na rede foram realizados em condições normais de funcionamento. Os resultados obtidos encontram-se demonstrados nas Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

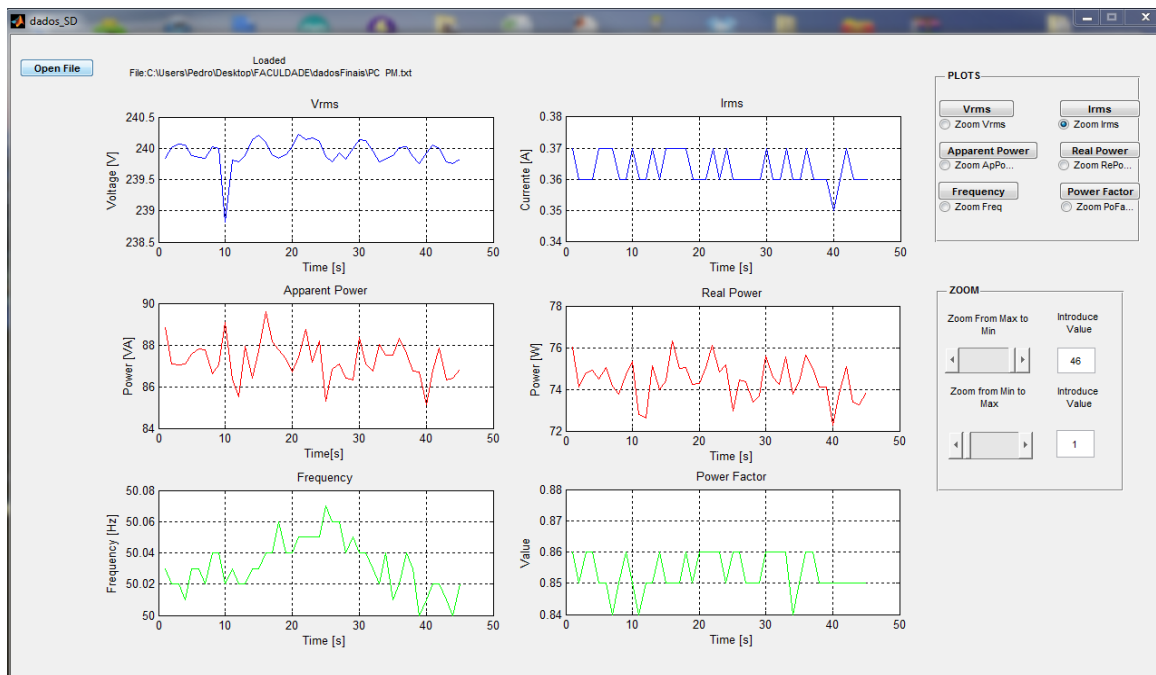


Figura 5.12 – Dados da monitorização de consumos de um computador

Pela Figura 5.12 verifica-se que o computador apresenta um consumo de potência da ordem dos 75 W para uma corrente de aproximadamente 0,35 A.

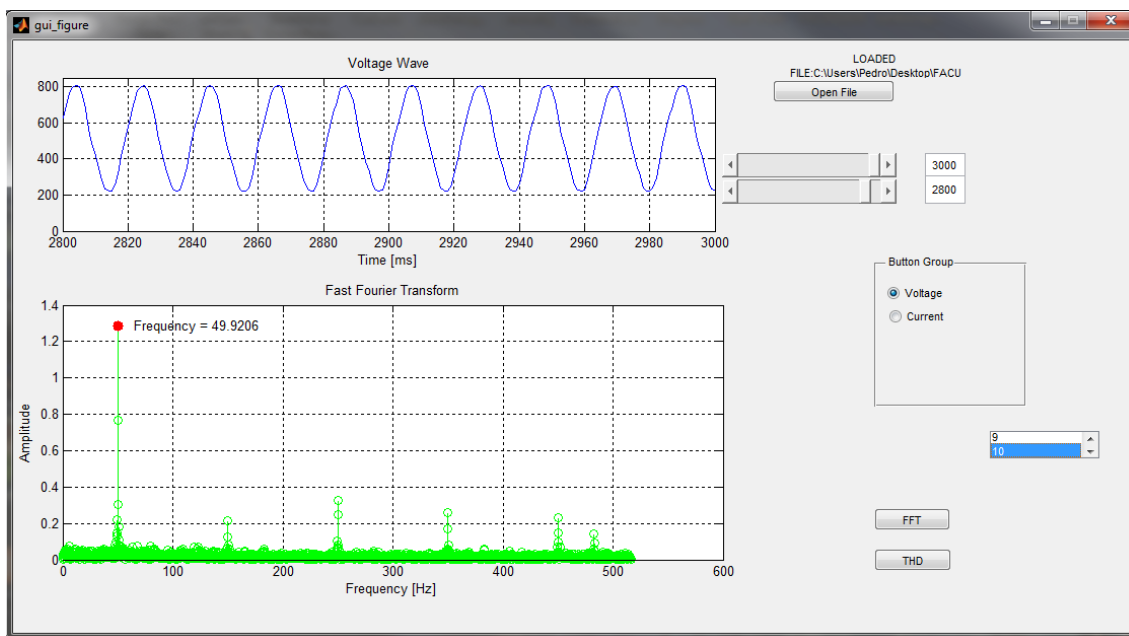


Figura 5.13 – Forma de onda de tensão e respectiva transformada de Fourier para o computador

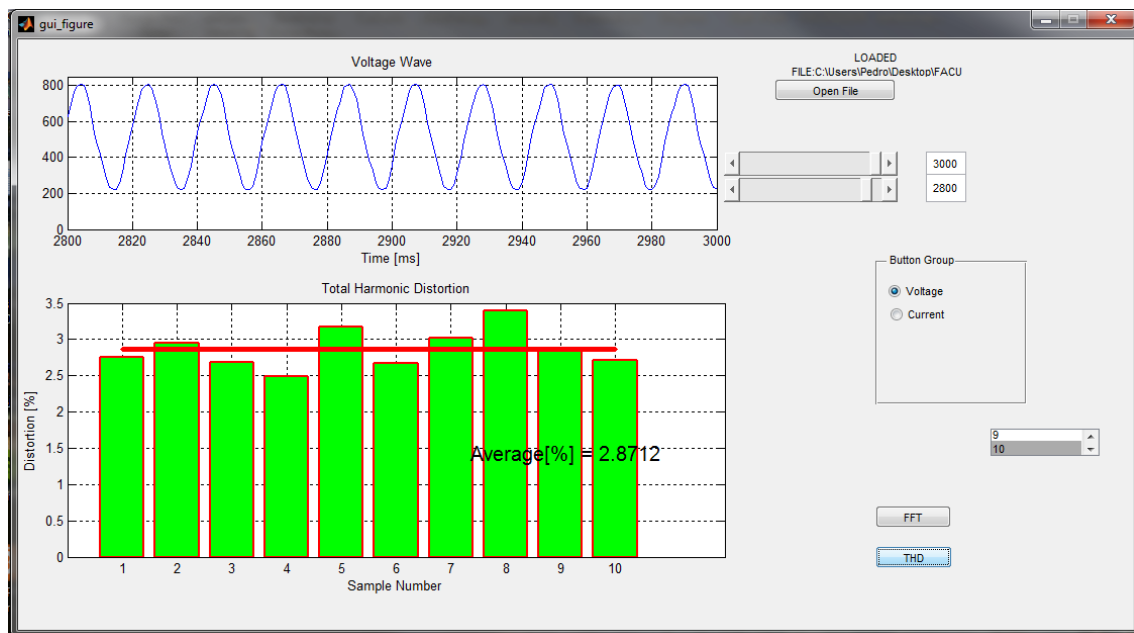


Figura 5.14 – Forma de onda de tensão e respectiva distorção harmônica para o computador

A forma de onda da tensão, a sua frequência fundamental e a sua distorção harmônica apresentam-se normais e dentro dos padrões.

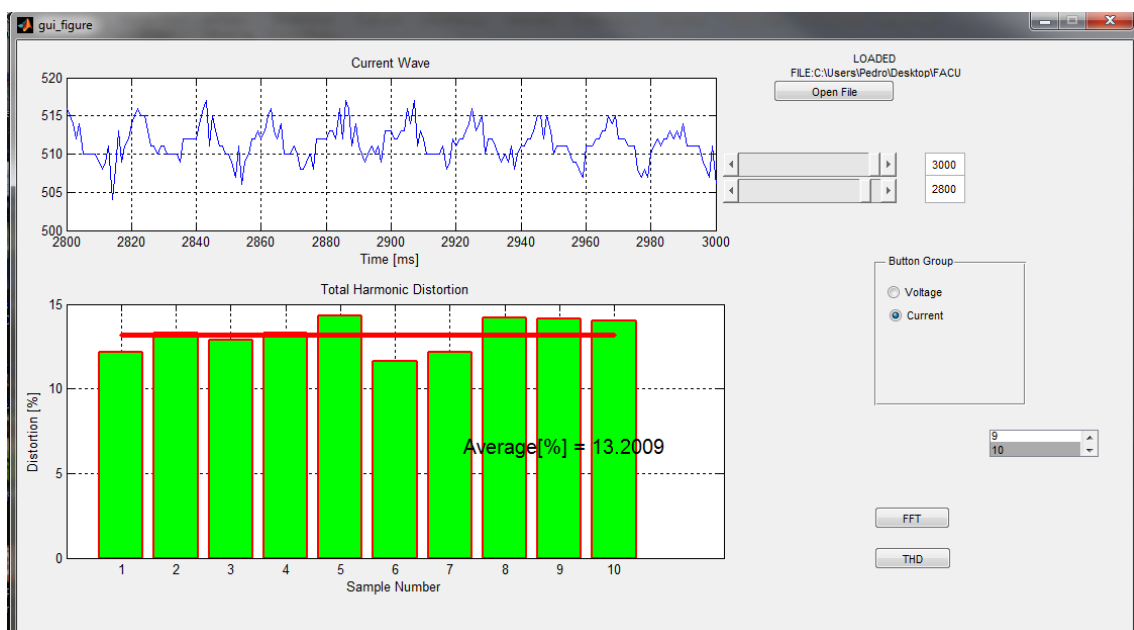


Figura 5.15 – Forma de onda de corrente e respectiva distorção harmônica para o computador

No entanto, a forma de onda da corrente apresenta uma elevada taxa de poluição harmônica. Devido a isto é possível afirmar que um conjunto de computadores pode influenciar de forma significativa a qualidade de energia da rede.

## Aquecedor

Para a realização deste ensaio utilizou-se um aquecedor da marca Lloytron, que possuía uma potência de 2 kW. Os resultados obtidos encontram-se demonstrados nas Figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19.

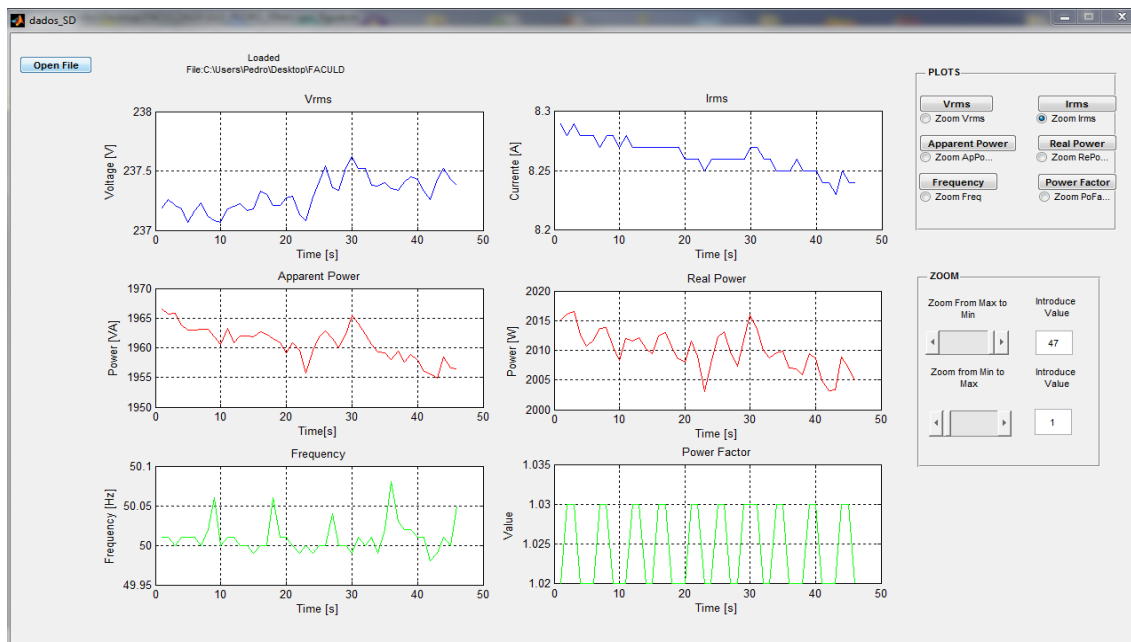


Figura 5.16 - Dados da monitorização de consumos de um computador

A potência activa consumida é de aproximadamente 2010 W. A corrente consumida pelo aquecedor é de aproximadamente 8,24 A para uma tensão de aproximadamente 237,4 V resultando numa potência aparente de aproximadamente 1956 VA como verificável pelos gráficos. O aquecedor é um equipamento puramente resistivo pelo que o seu factor de potência deveria ser de 1. O resultado obtido indica um factor de potência de 1,02 provavelmente devido a um pequeno erro de calibração.

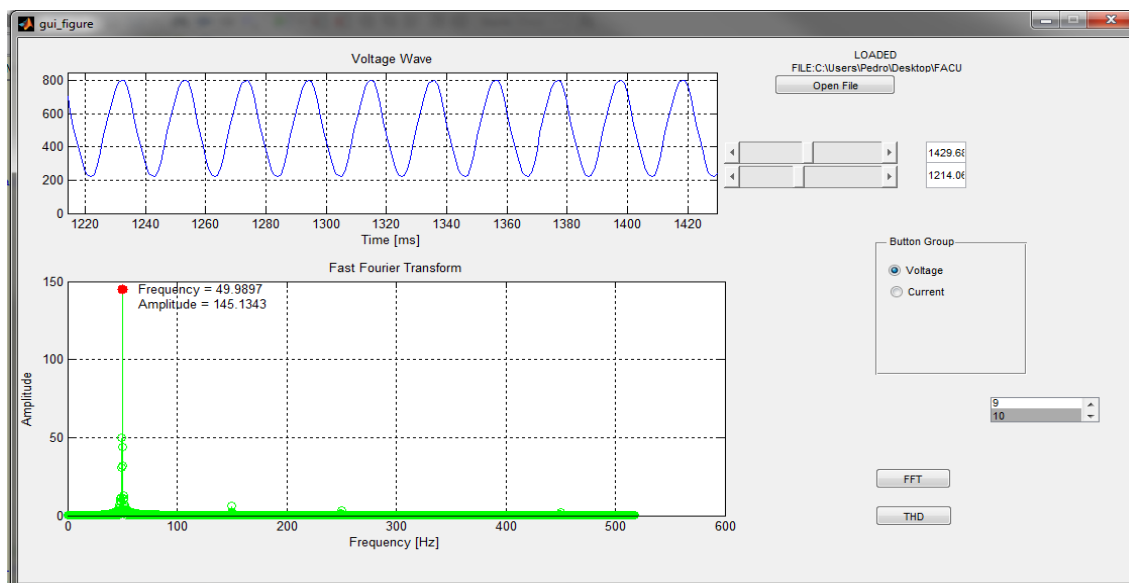


Figura 5.17- Forma de onda da tensão e respectiva transformada de Fourier para o aquecedor

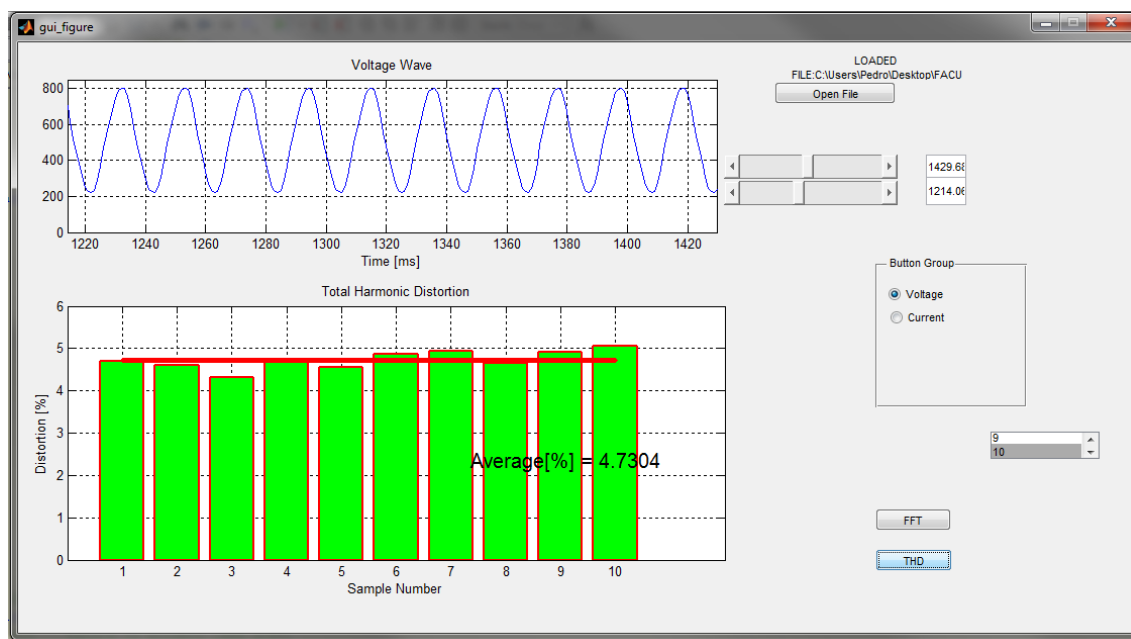


Figura 5.18 – Form de onda da tensão e respectiva distorção harmónica para o aquecedor

A forma de onda da tensão, a frequência da rede e a distorção harmónica causada pelo aquecedor são consideradas normais.

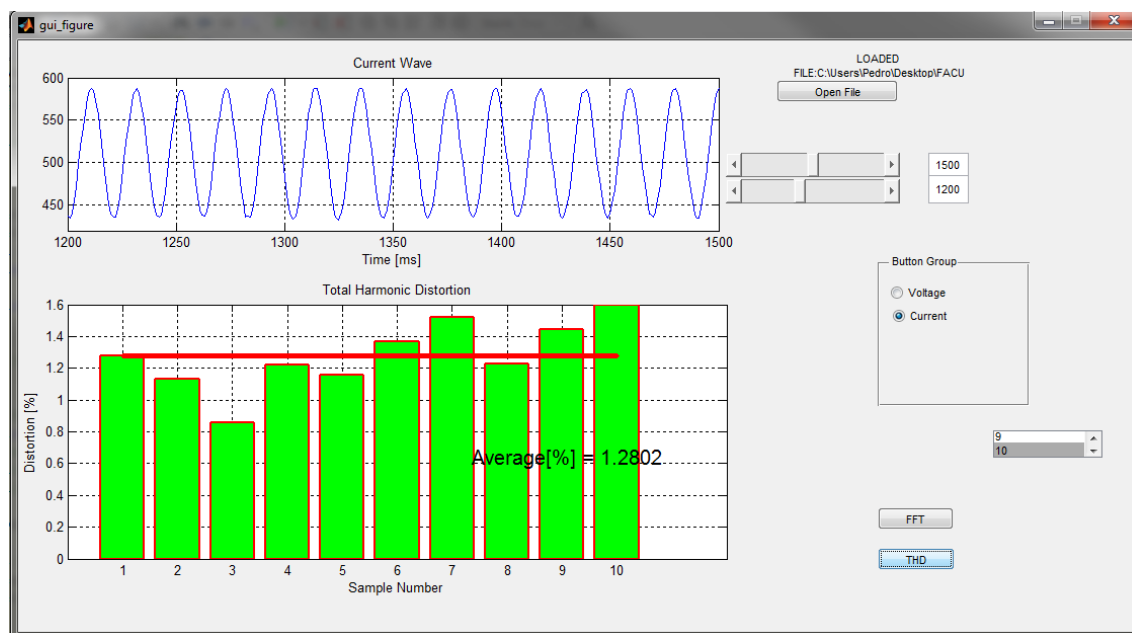


Figura 5.19 - Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para o aquecedor

De notar que a forma de onda da corrente apresenta uma distorção harmónica praticamente inexistente, sendo possível distinguir uma sinusóide perfeita ao contrário dos aparelhos eléctricos ensaiados anteriormente. Isto deve-se ao facto do aquecedor ser puramente resistivo pelo que não introduz harmónicas na rede. É possível concluir que um aquecedor apresenta consumos de potência elevados, não tendo no entanto qualquer influência na qualidade da rede eléctrica.

## Microondas

Os microondas são aparelhos que tendem a introduzir ruído de corrente na rede eléctrica. Este teste foi realizado recorrendo a um microondas da marca Crown, com uma potência de entrada (consumo) de 1100 W e uma potência de saída (aproveitada) de 700 W. Os resultados obtidos encontram-se ilustrados nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23.

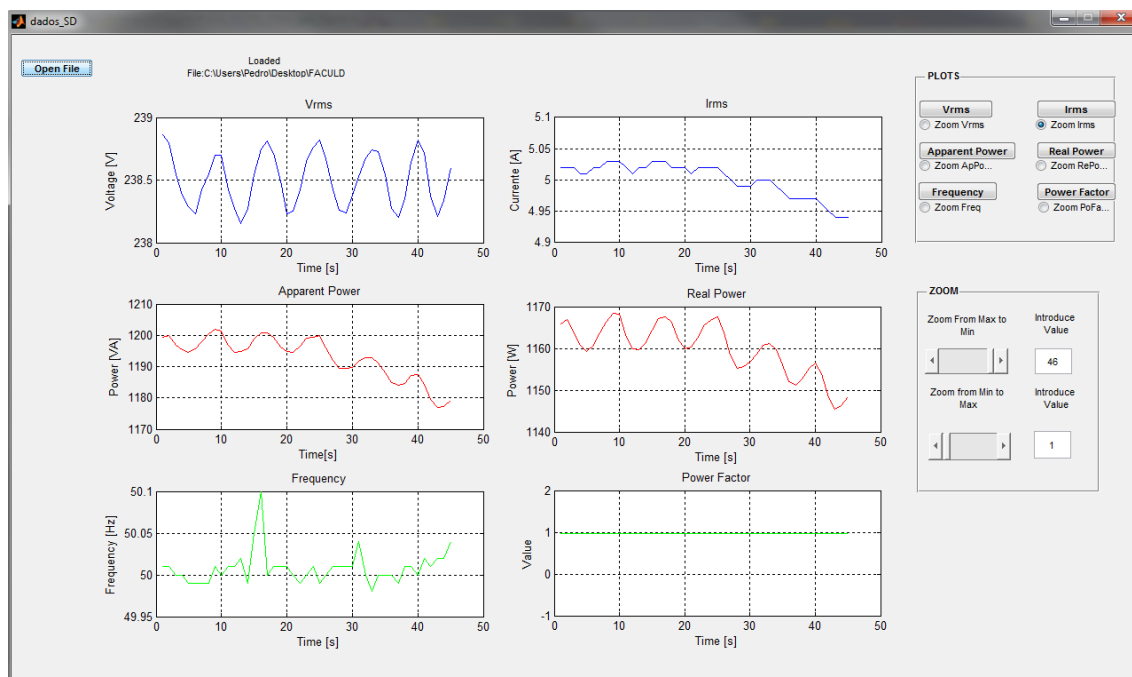


Figura 5.20 – Dados da monitorização de consumos de um microondas

O microondas tal como o aquecedor é um equipamento resistivo pelo que o seu factor de potência vale 1. A potência activa consumida pelo microondas é de aproximadamente 1100 W, como expectável. A corrente consumida é de aproximadamente 5 A.

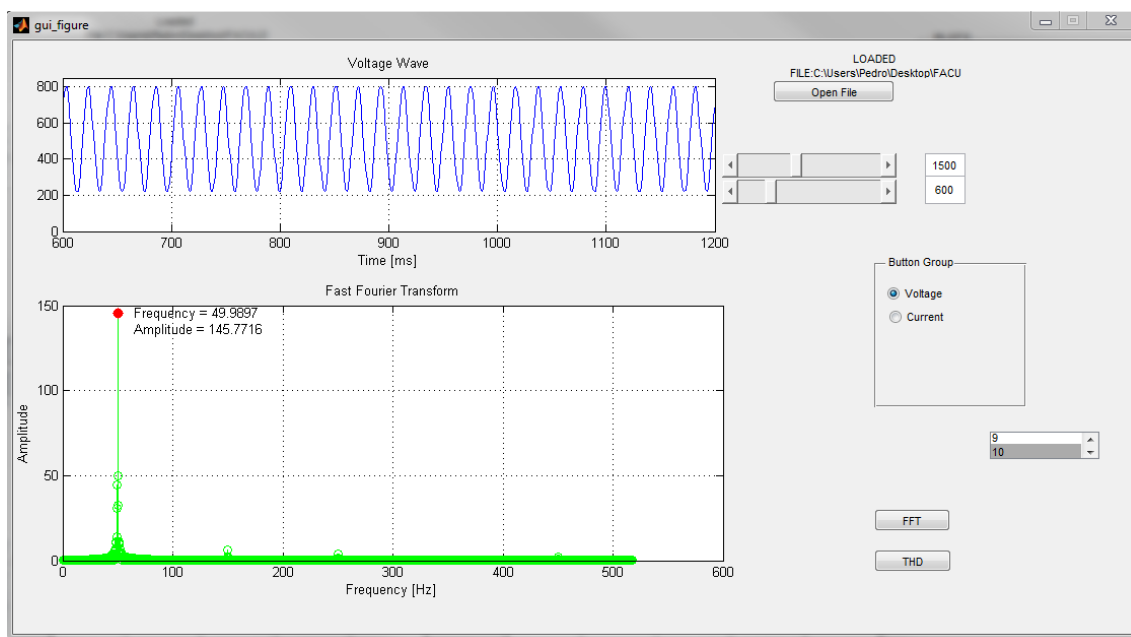


Figura 5.21 – Forma de onda da tensão e respectiva transformada de Fourier para o microondas

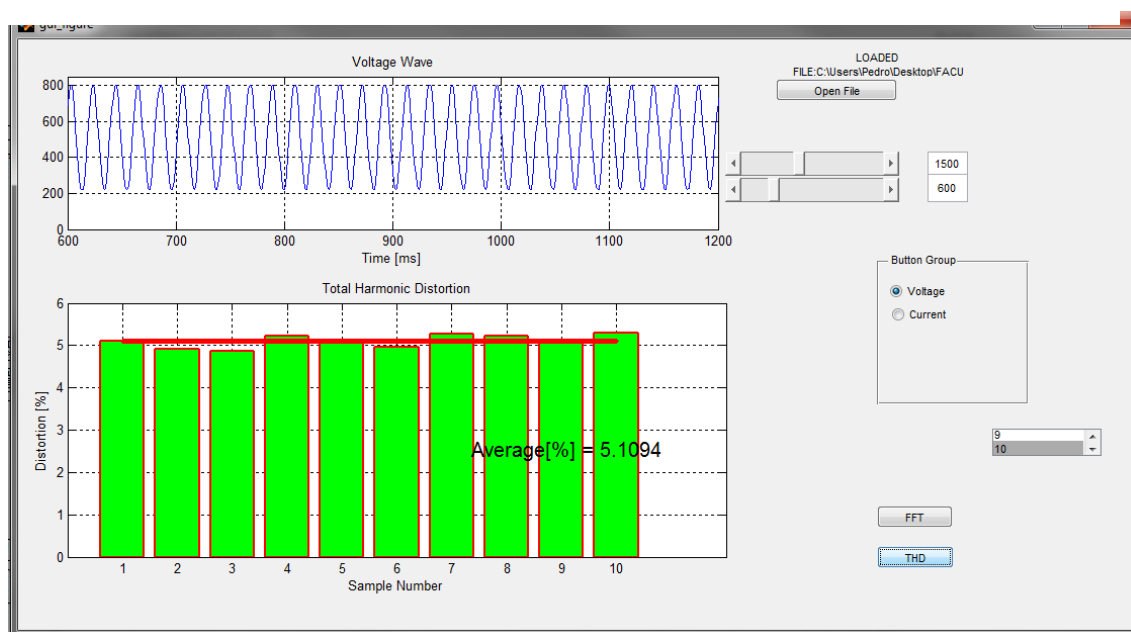


Figura 5.22 – Forma de onda da tensão e respectiva distorção harmónica para o microondas

A distorção harmónica de tensão introduzida pelo microondas e como verificável pela Figura 5.22 é de aproximadamente 5 %, sendo que a frequência da onda de tensão é de aproximadamente 50 Hz.



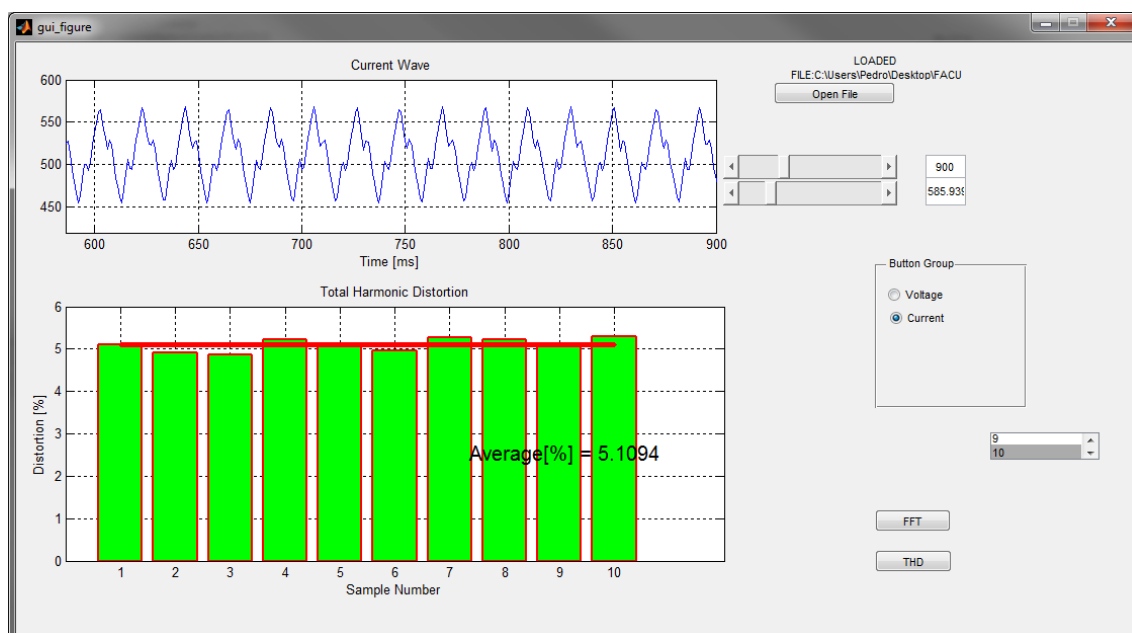


Figura 5.23 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para o microondas

Tal como expectável a forma de onda de corrente produzida pelo microondas apresenta alguma poluição harmónica. No entanto e comparativamente com as outras formas de onda de corrente, a forma de onda do microondas apresenta variações constantes ao longo do tempo, sendo que as perturbações ocorrem sempre na mesma posição da onda. A distorção harmónica média é de aproximadamente 5 %.

### Lâmpada incandescente *versus* Lâmpada fluorescente

Actualmente e devido à preocupação em reduzir os consumos energéticos tornou-se habito substituir as lâmpadas incandescentes por lâmpadas economizadoras de energia ou lâmpada fluorescente. Neste teste comparou-se o consumo e influências na qualidade de energia da rede eléctrica entre uma lâmpada incandescente de 60 W e uma lâmpada fluorescente de 11 W e 0,096 A. As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam os consumos da lâmpada de 60 W e 11 W respectivamente. De notar que cerca de 18 W de consumo são devidos ao monitor que se encontrava ligado na altura da obtenção de dados. Na Figura 5.24 o ligar da lâmpada só ocorre aproximadamente aos 2 segundos de tempo.

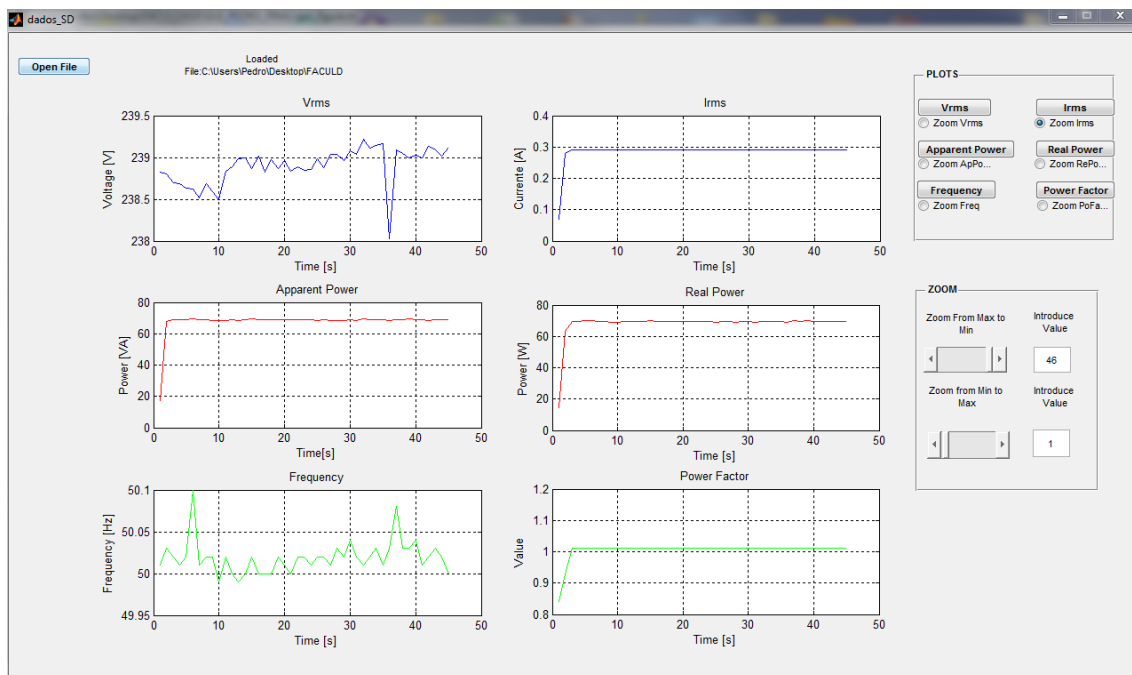


Figura 5.24 – Dados da monitorização de consumos de uma lâmpada incandescente de 60 W

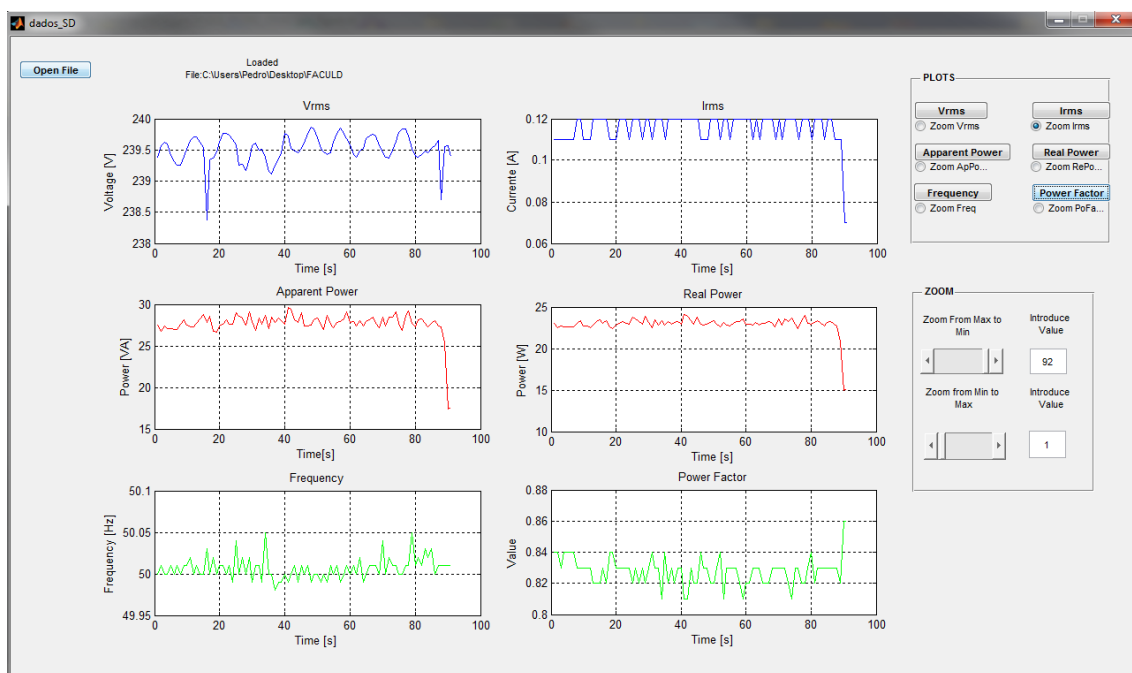


Figura 5.25 - Dados da monitorização de consumos de uma lâmpada fluorescente de 11 W

Como é possível verificar no caso da lâmpada de 60 W o factor de potência tem o valor de 1 pois uma lâmpada incandescente é formada por um filamento ou resistência que ao aquecer emite luz, ou seja, uma lâmpada incandescente é uma carga puramente resistiva. O consumo de corrente é de aproximadamente 0,3 A. Comparativamente, a lâmpada

economizadora de 11 W apresenta um factor resistivo de aproximadamente 0,83. A potência activa consumida é de aproximadamente 7 W (25 – 18 W do monitor) e a corrente consumida é de aproximadamente 0,02 A (0,11 – 0,9 A do monitor), valores que se encontram ligeiramente abaixo dos valores nominais da lâmpada (11 W e 0,096 A). Tais valores podem ser justificados pelo facto de a lâmpada fluorescente já se encontrar ligada à algum tempo, o que proporcionou um aumento de rendimento da mesma.

Nas Figuras 5.26 e 5.27 é possível verificar a influência de cada uma das lâmpadas na forma do sinal de corrente e por consequência na distorção harmónica de corrente.

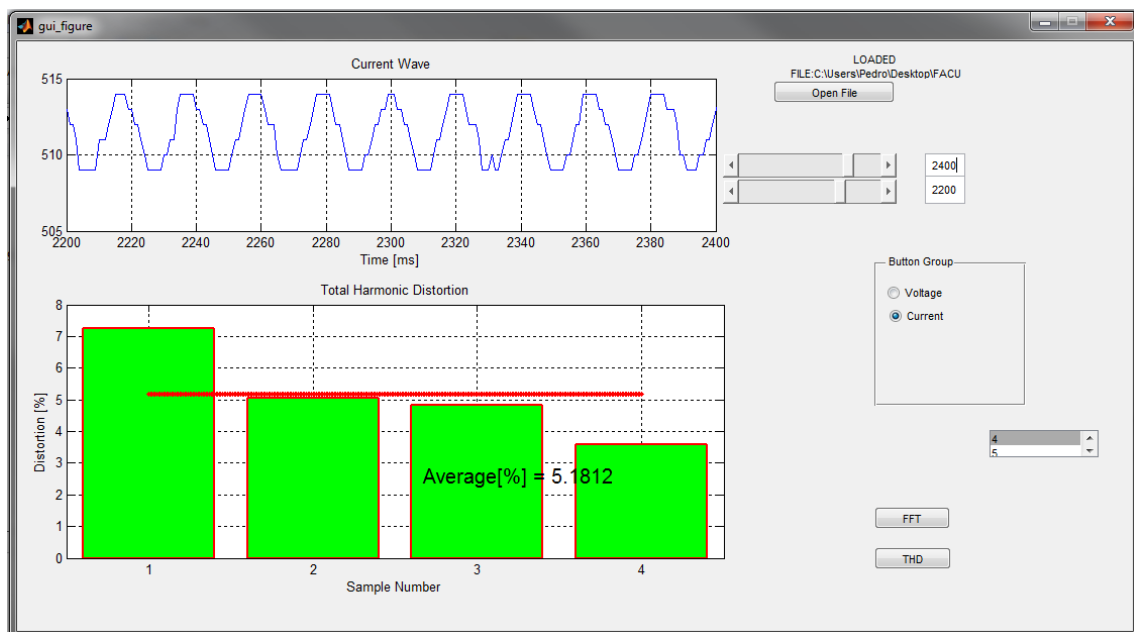


Figura 5.26 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para a lâmpada incandescente de 60 W

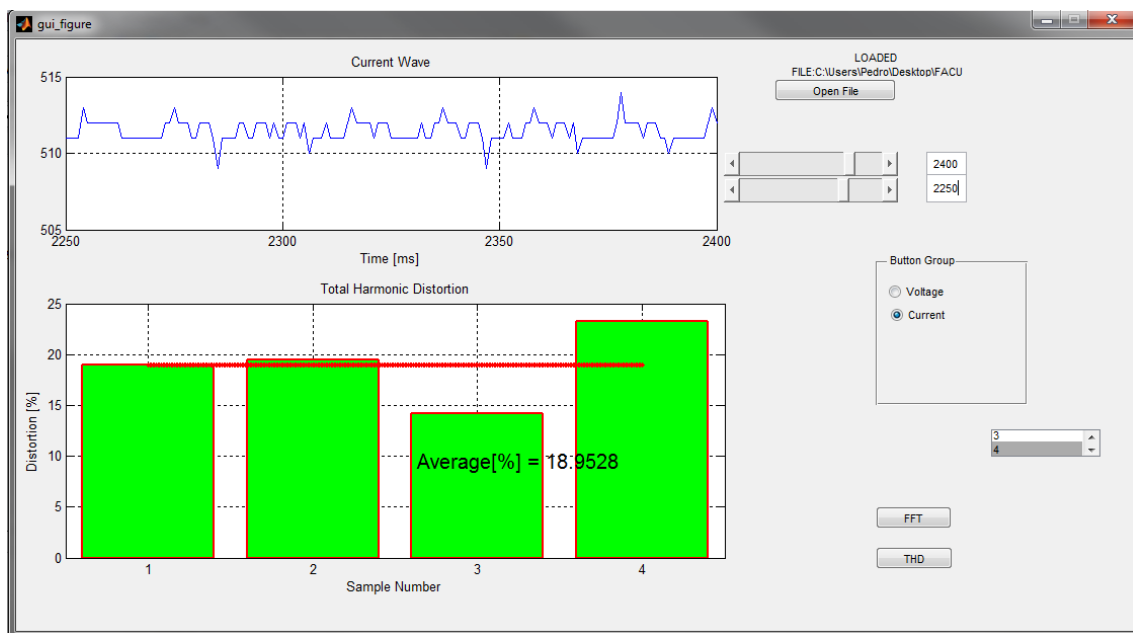


Figura 5.27 – Forma de onda da corrente e respectiva distorção harmónica para a lâmpada fluorescente de 11 W

Uma análise das Figuras anteriores permite concluir que a lâmpada incandescente de 60 W, devido ao facto de ser constituída por uma carga puramente resistiva, apresenta uma forma de onda com uma poluição harmónica muito inferior à apresentada pela lâmpada fluorescente de 11 W. No caso da lâmpada economizadora a ocorrência de inter-harmónicas não permite distinguir a forma de onda fundamental. Nas Figuras 5.28 e 5.29 é possível comparar as harmónicas causadas pelas diferentes lâmpadas.

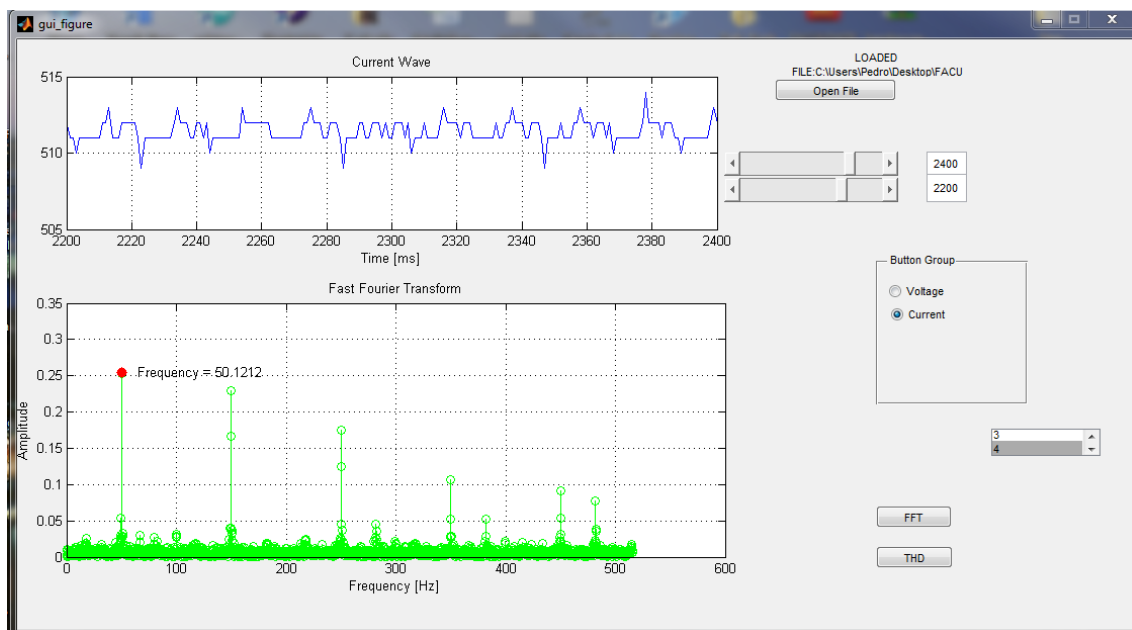


Figura 5.28 – Forma de onda da corrente e respectiva transformada de Fourier para a lâmpada fluorescente de 11 W

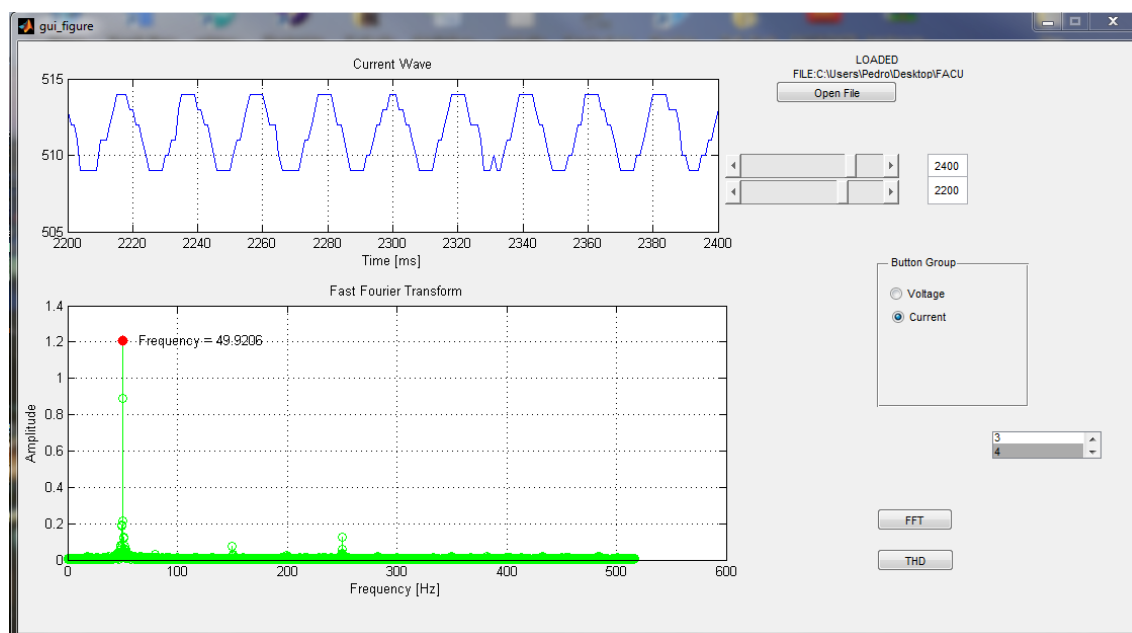


Figura 5.29 – Forma de onda da corrente e respectiva transformada de Fourier para a lâmpada incandescente de 60 W

Como verificável pela Figura 5.29 a lâmpada incandescente tem uma frequência fundamental de 50 Hz e apresenta uma terceira e uma quinta harmónica, no entanto pouco significativas. Na Figura 5.28, relativa à lâmpada fluorescente, verifica-se a existência de diversas harmónicas, sendo que a terceira e a quinta possuem uma amplitude muito próxima da amplitude da frequência fundamental. É possível concluir que as lâmpadas economizadoras de energia influenciam negativamente a qualidade da energia na rede eléctrica.

### 5.3.3 Análise sumária de resultados

Atendendo aos resultados obtidos no subcapítulo 5.3 e aos erros de medição obtidos no subcapítulo 5.2, verifica-se que o sistema de monitorização implementado corresponde às especificações do projecto.

Grande parte dos equipamentos eléctricos utilizados actualmente, como verificado, introduzem diversas perturbações na qualidade da forma de onda da rede eléctrica produzindo harmónicas e podendo levar ao mau funcionamento de outros equipamento que se encontrem na mesma instalação eléctrica mais sensíveis às variações.

Pelos dados obtidos foi ainda possível concluir que de modo a estudar diversos parâmetros relativos à qualidade da energia, são necessárias medições prolongadas e com um número significativo de dados e amostras. Entre esses problemas destacam-se principalmente as interrupções de fornecimento de tensão, visto que a sua ocorrência é esporádica pelo que uma análise das interrupções de fornecimento de energia na rede exige uma medição de dados por um longo período de tempo.

## 6 - Conclusão

O projecto e construção do sistema de monitorização de energia eléctrica proposto, recorrendo ao Arduino, foi concluído com sucesso. Os objectivos iniciais foram plenamente alcançados destacando-se as seguintes funcionalidades: monitorização ao nível do equipamento e do quadro eléctrico, visualização dos dados em tempo real recorrendo a um computador, possibilidade de análise dos diversos factores da qualidade de energia na rede, gravação de dados e implementação de gráficos.

A vantagem deste equipamento em comparação com outros dentro da mesma gama de preços é a possibilidade de monitorização de consumos e influências energéticas quer ao nível do quadro eléctrico como ao nível do equipamento eléctrico o que permite ao utilizador perceber qual o peso e influências de cada equipamento e quais as implicações dos mesmos. O conhecimento dos gastos energéticos permite ao utilizador um maior conhecimento e uma maior percepção das suas acções o que pode levar o mesmo a implementar mudanças de comportamento no sentido da redução dos gastos e por conseguinte uma redução na emissão de gases efeito de estufa para a atmosfera.

O estudo dos diversos sistemas de monitorização de energia eléctrica, apresentado no capítulo 3, resultou no conhecimento das tecnologias e funcionalidades necessárias ao desenvolvimento do sistema proposto nesta dissertação, servindo como comparação para o modelo a implementar. O sistema implementado teve em conta as funcionalidades mais básicas dos sistemas de monitorização, monitorização de corrente e tensão, bem como as funcionalidades mais avançadas relacionadas com a monitorização da qualidade de energia na rede. Os testes de funcionamento realizados demonstraram que o sistema de monitorização desenvolvido está em conformidade com as especificações e os objectivos estabelecidos, adequando-se às funções para que foi concebido.

Ao longo do processo de implementação do sistema de monitorização surgiram diversos contratempos, estando a grande maioria relacionada com as limitações de processamento e de memória do Arduino, que obrigaram à reformulação de alguns processos. Salientam-se as dificuldades encontradas na gravação de dados relativos à corrente e à tensão instantânea e na obtenção de pontos suficientes que permitissem a realização de gráficos suficientemente precisos. Verificou-se ainda que a memória interna do Arduino é algo limitada pelo que o programa implementado teve em consideração todas essas limitações. Salienta-se ainda que o processo de calibração foi exigente e revelou diversos desafios pelo que é possível a existência de alguns erros de medição como comprovados no capítulo 5. Um dos casos onde se verifica um maior erro de medição é na leitura dos valores de potência, possivelmente e como referido anteriormente a pequenos erros de calibração entre a simultaneidade dos sinais de corrente e tensão.

Conclui-se que através da utilização do Arduino é possível implementar o sistema pretendido, não deixando no entanto grande margem para uma melhoria do sistema. Um

desenvolvimento futuro seria a aquisição de um *shield* que permitisse a comunicação sem fios entre o computador e o Arduino. No entanto, devido às limitações de memória do Arduino, a aquisição de *shields* e a programação dos mesmos tende a ocupar mais memória do que a disponível após a implementação do sistema de monitorização de energia. Um outro factor que pode inviabilizar a expansão e melhoria do sistema são os custos, visto que a grande maioria dos *shields* possui um preço superior a 30 euros.

Conclui-se portanto que a utilização do Arduino Uno juntamente com a implementação de um *software* de visualização de gráficos permitiu alcançar todos os objectivos propostos, sendo no entanto um projecto com uma flexibilidade expansiva limitada. No entanto encontram-se em desenvolvimento outros modelos do Arduino, com maior capacidade de memória e de processamento, pelo que este projecto a médio/longo prazo pode servir como base para o desenvolvimento de um protótipo mais desenvolvido.



## Referências Bibliográficas

(Afonso e Martins, 2003), Afonso, J. e Martins, J., “Qualidade de Energia Eléctrica na Indústria”, Ciclo de Seminários EUVEO, As Oportunidades das Ameaças: A Qualidade da Energia Eléctrica, 2003.

(Amorim e Melo, 2007), Amorim, A. e Melo, N. “Qualidade da Energia Eléctrica: Experiência EDP como operador da rede de distribuição”, Seminário – Qualidade da Energia Eléctrica, 2007.

(Arduino, 2011), Arduino Company. Obtido em Junho de 2012 de [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

(Barros, 1999) Barros, Maria Teresa Correia, "A Indústria da Energia Eléctrica, um Sector em Mudança", Revista Engenium de Fevereiro de 1999, pp. 34-35.

(Belkin, 2011), *Energy Saving Devices*. Obtido em Junho de 2012, de <http://www.belkin.com/>

(Block-Trafo, 2012), Obtido em Setembro de 2012 de [www.block-trafo.de/en\\_IN/home](http://www.block-trafo.de/en_IN/home)

(Bollen, 2000), Bollen, Math H. J. “Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions”, IEEE Press series on power engineering – Wiley-Interscience, 2000, ISBN 0-7803-4713-7.

(Braga, 2009), Braga, N. “Detecção de harmónicas em AC”, 2009

(CE, 2008a), Europe’s current and future energy position Demand - resources - investments. Bruxelas, 13 de Novembro de 2008: Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões.

(Chauvin Arnoux, 2008), *Professional Measurement Instruments*. Obtido em Junho de 2012, de <http://www.chauvin-arnoux.com/>

(Conselho da União Europeia, 2006). “Plano de Acção para a Eficiência Energética: Concretizar o Potencial”, European Union, 2006.

(Conselho da União Europeia, 2008), “Energy and Climate Change – Elements of the final compromise”, European Commission Release, 2008.

(cooking-hacks, 2012), Cooking hacks tasty electronics. Obtido em Junho de 2012 de [www.cooking-hacks.com](http://www.cooking-hacks.com)

(Delgado, 2000), Delgado, Joaquim et al, "A qualidade da Energia Eléctrica na Actualidade e o Uso de Novas Tecnologias Reparadoras", Instituto Politécnico de Viseu, 2000.

(Delgado,2002), Delgado, Joaquim, " Gestão da qualidade total aplicada ao sector do fornecimento da energia eléctrica", Universidade de Coimbra, 2002.

(Doss, 2011), *Power and Performance*. Obtido em Junho de 2012, de <http://www.doss.com.au/>

(EDP, 2005), Manual de Boas Práticas de Eficiência Energética. Obtido em Junho de 2012, de Eco EDP: [http://www.eco.edp.pt/images/stories/Manual\\_de\\_boas\\_prticas.pdf](http://www.eco.edp.pt/images/stories/Manual_de_boas_prticas.pdf)

(Efergy, 2009), *Home of energy monitors, energy meters and electricity monitors*. Obtido em Junho de 2012, de <http://www.efergy.com/>

(European Union, 2008), "Energy efficiency: delivering the 20 % target", European Union Press Release, 2008.

(Fluke, 2012), Equipamentos de teste Fluke. Obtido em Junho de 2012, de <http://www.fluke.com/Fluke/ptpt/home/default>

(IEA, 2008), Energy Efficiency Requirements in Buildings Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings. France: International Energy Agency

(Kyoto, 1997), United Nations Framework Convention on Climate Change. Obtido em Junho de 2012 de [http://unfccc.int/essential\\_background/kyoto\\_protocol/items/1678.php](http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/1678.php)

(Lopes, 1998) Lopes, João Peças et al, "Qualidade de Serviço - Caracterização da Situação e Recomendações", Relatório Elaborado pelo INESC-PORTO, Unidade de Sistemas de Energia, Janeiro de 1998

## Apêndice I: Lista de Material

Descrição	Preço Unitário (€)
Arduino Uno	20,00 €
Transformador 9V AC	15,00 €
Sensor de Corrente Efergy	10,00 €
SDCard Shield	20,00 €
Sdcard 2 Gb	8,00 €
Resistência 100k $\Omega$ 0,25W	0,30 €
Resistência 10k $\Omega$ 0,25W	0,30 €
Resistência 330k $\Omega$ 0,25W	0,30 €
Resistência 56 $\Omega$ 0,25W	0,30 €
Condensador 10 $\mu$ F 25V	0,80 €
Preço Total	75,00 €

Preço do projecto sem contabilização de posterior mão-de-obra.